

## 1. UVOD

Tribologija je znanost i tehnika o površinama u dodiru i relativnom gibanju i o pratećim aktivnostima, [1]. Danas postoji velik broj postupaka modifikacije površina koji služe poboljšanju svojstava materijala, od poboljšanja korozijske otpornosti do povećanja otpornosti na trošenje. Upravo povećanjem otpornosti na trošenje upotrebom metoda modifikacije površine mogu se postići značajne uštede kako neposredne, npr. u materijalu, energiji i novcu, tako i posredne, npr. smanjenje troškova održavanja i zastoja u proizvodnji. U ovom radu je ponuđen kratak opis jednog od mogućih postupaka modifikacije površine. U ovom slučaju radi se o naštrcavanju aluminij-oksidge keramičke prevlake na čeličnu podlogu postupkom hladnog plinskog, tj. plamenog naštrcavanja. Također je opisano i ispitivanje abrazijske otpornosti navedene prevlake prema normi ASTM G65-94.

## 2. ABRAZIJA

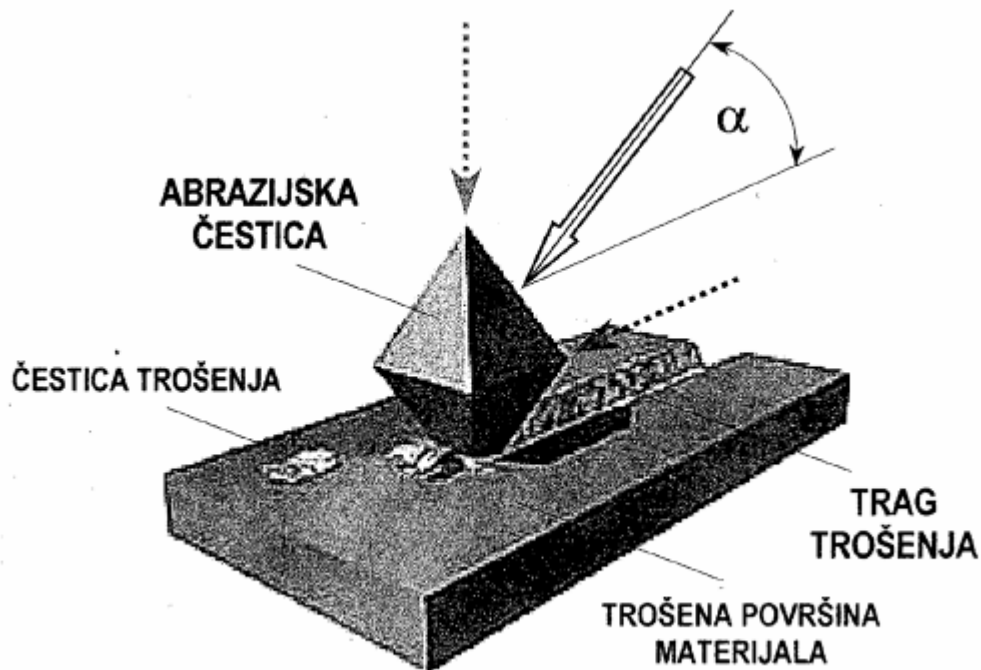
Premda postoji vrlo velik broj slučajeva trošenja, većina autora suglasna je da postoje četiri osnovna mehanizma trošenja, a to su:

- abrazija
- adhezija
- umor površine
- tribokorozija

Najčešći mehanizam koji se javlja je abrazijsko trošenje. Otpornost na abrazijsko trošenje zahtijeva materijal prevlake koji posjeduje odgovarajuću tvrdoću, u pravilu veću od tvrdoće osnovnih materijala.

## 2.1. TEORIJSKI MODEL ABRAZIJE

Teorijski model abrazije odgovara modelu mikrorezanja, tj. odvajanja čestica trošenja u mikropodručju, a u razmatranju se često koristi shematski prikaz mikrorezanja rubom pravilne četverostrane piramide koja pod određenim kutom prodire u površinu trošenog materijala, kao što je prikazano na slici 1.

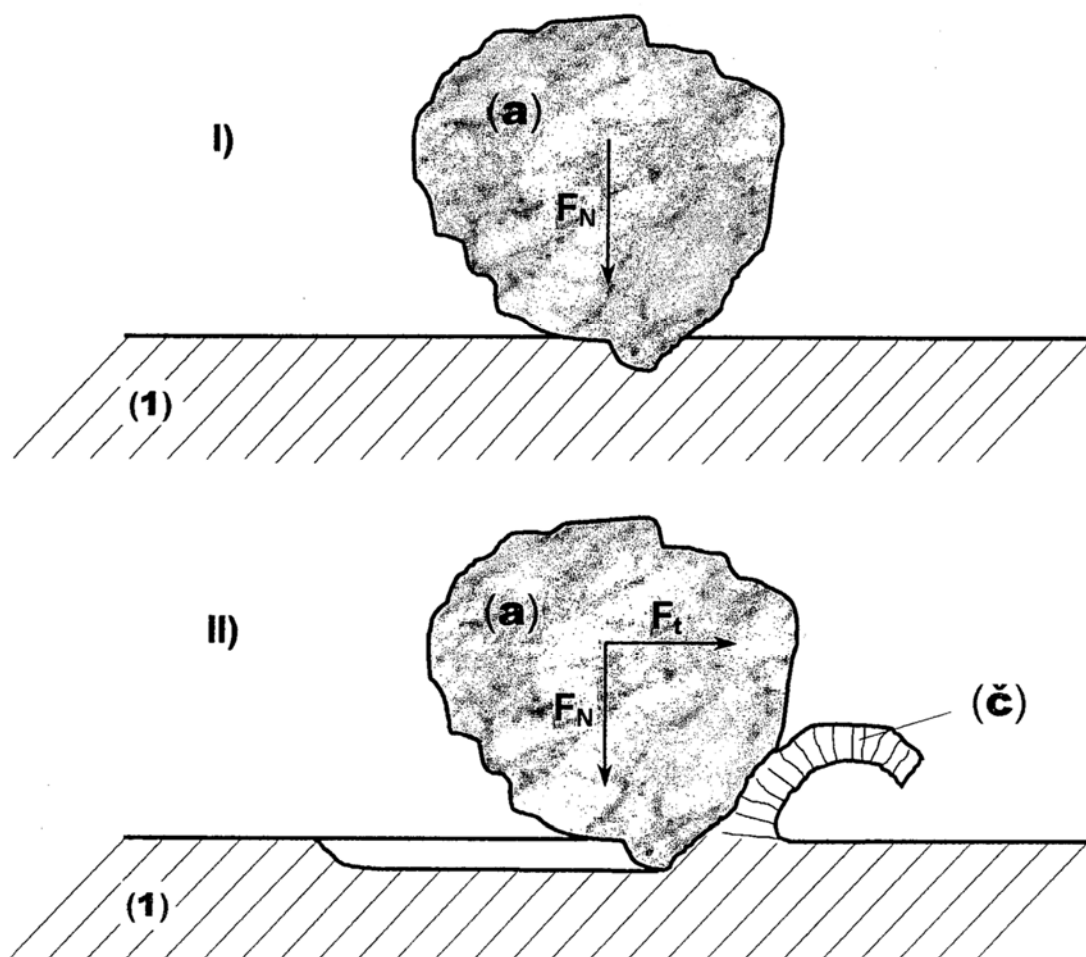


Slika 1 – Teorijski model abrazije, [2]

## 2.2. REALNI MODEL ABRAZIJE

Realni model abrazije temelji se na činjenici da su abrazijske čestice u prirodi uglavnom nedefinirane geometrije. Jedinični događaj realnog modela abrazije ukazuje, prema [1], na dvije faze u nastanku jedne čestice trošenja, prikazane slikom 2:

- I. Proces nastajanja pukotine prodiranjem abrazijske čestice (a) u površinu materijala (1) pod utjecajem normalne komponente opterećenja  $F_N$ .
- II. Proces napredovanja pukotine istiskivanjem materijala u obliku čestice trošenja (č) pod utjecajem tangencijalne komponente opterećenja  $F_t$ .



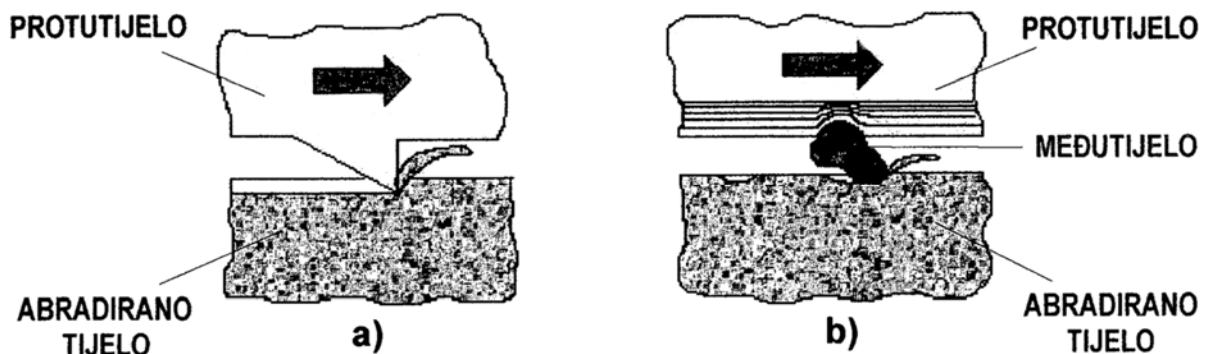
Slika 2 – Jedinični događaj abrazije, [1]

Mehanizam abrazije moguće je analizirati s nekoliko različitih gledišta:

1. Ovisno o strukturi tribosustava u kome se zbiva abrazija mogu se pojaviti dva oblika abrazije, prikazana slikom 3:

- a) Abrazija u dodiru dva tijela – tribosustav se sastoji od dva funkcionalna dijela (abrazivno tijelo i abrazijsko protutijelo)
- b) Abrazija u dodiru tri tijela – tribosustav se sastoji od dva funkcionalna dijela (abrazivno tijelo i protutijelo), te međutijela (čestice) koje se gibaju slobodno između funkcionalnih dijelova i djeluju abrazijski.

Prema rezultatima više istraživanja [3,4] odnošenje materijala u dodiru s tri tijela je znatno manje nego u slučaju abrazije dva tijela. Razlog tomu je što čestice abrazije samo oko 10 % vremena provode u odnošenju materijala dok se ostatak vremena kotrljaju u slobodnom međuprostoru.



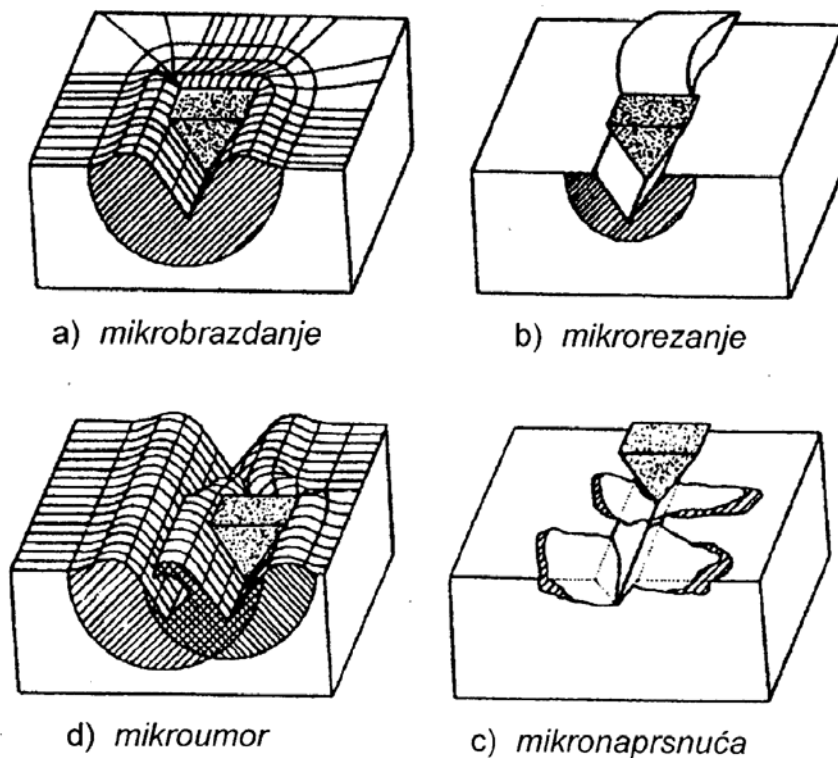
Slika 3 – Abrazija u dodiru dva tijela (a) i tri tijela (b), [2]

2. Ovisno o međusobnom djelovanju između abrazijskih čestica i trošene površine to su:

- a) Mikrobrazdanje (slika 4a) –odnošenje materijala proporcionalno volumenu brazde nastale plastičnom deformacijom pri prolazu jedne abrazijske čestice, uz uvjet da se rubovi brazde odvoje od površine u obliku produkata trošenja. U idealnom slučaju mikrobrazdanja jedna abrazijska čestica neće proizvesti

produkte trošenja nego će materijal biti potisnut u stranu u obliku bočnih «grebena»

- b) Mikrorezanje (slika 4b) – odnošenje materijala jednako volumenu zarez nastalog prolaskom abrazivne čestice
- c) Mikronaprsnuća (slika 4c) – odnošenje materijala s krhke površine mehanizmom nastanka i širenja mikropukotina. Pri tome se s površine odnose veliki djelići materijala.
- d) Mikroumor (slika 4d) – odnošenje materijala mehanizmom umora površine nastalim učestalim izmjeničnim opterećenjem. Materijal je izložen trenutnim deformacijama uslijed čega nastaju mikropukotine koje se zatim šire i koje u konačnici uzrokuju odvajanje dijelova materijala trošene površine. Mikroumor može nastati i kao posljedica višestrukog učestalog mehanizma mikrobrazdanja.

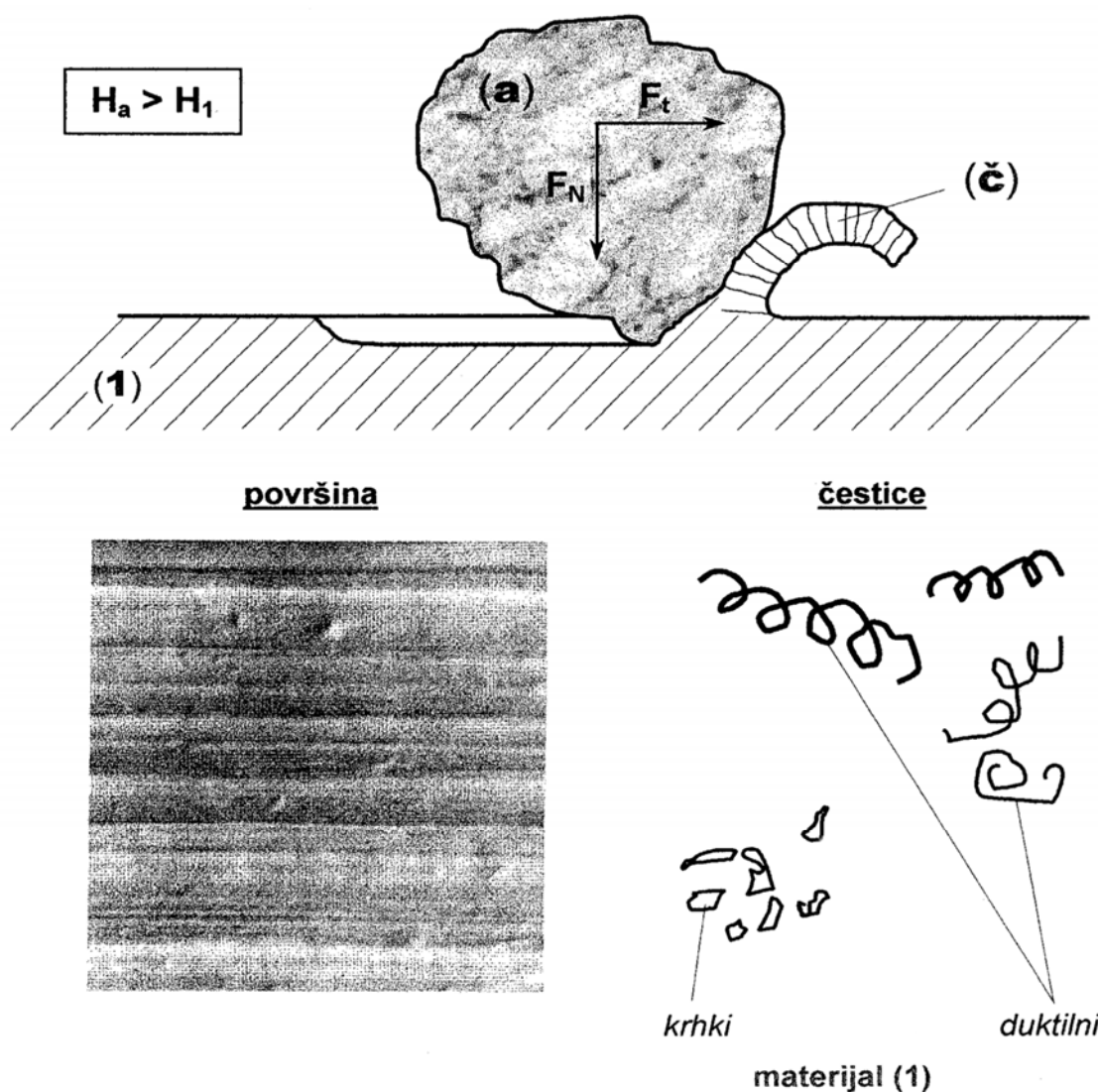


Slika 4 – Shematski prikaz mikromehanizama trošenja materijala, [5]

3. Ovisno o odnosu tvrdoća trošene površine i abraziva tri slučaja, prikazana slikama 5 do 7:

a) Čista abrazija

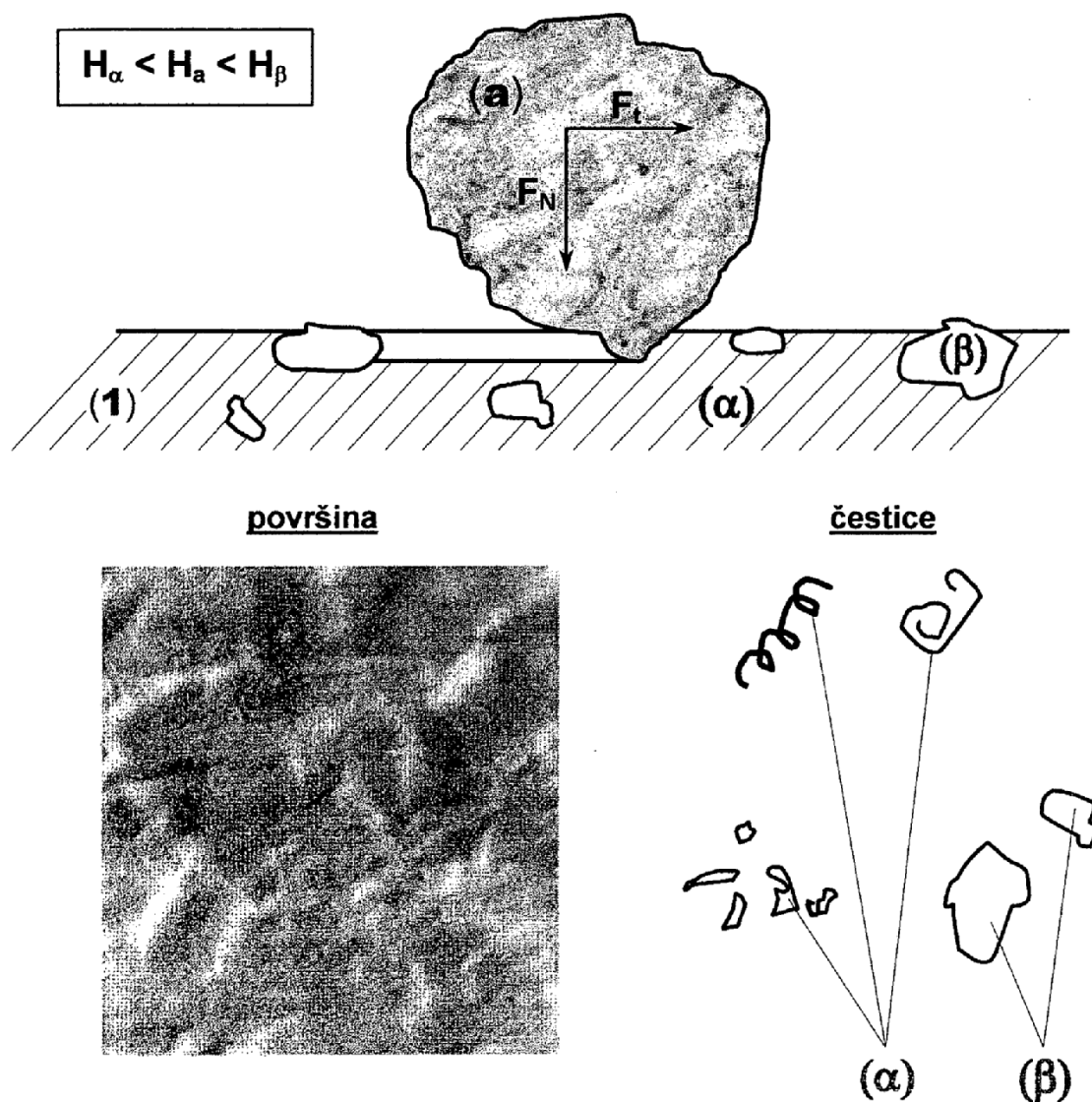
Nastaje u uvjetima kada je tvrdoća abraziva (a),  $H_a$  veća od tvrdoće površine materijala (1),  $H_1$ . Ukoliko je trošena površina materijala višefazna, tvrdoća abraziva je veća od tvrdoće svih faza iz kojih se površina sastoji. Trošena površina nakon abrazije je izbrazdana nizom ogrebotina, pruga i žljebova. Čestice trošenja su oblika spiralne neprekinute strugotine kada je abrazivni materijal duktilan, odnosno lomljene strugotine kada je abrazivni materijal krhak.



Slika 5 – Čista abrazija, [1]

b) Selektivna abrazija

Nastaje u uvjetima kada u abradiranom materijalu postoji faza ( $\beta$ ),  $H_\beta$  koja je tvrđa od abraziva ( $a$ ),  $H_a$ , pa stoga abraziv odnosi samo zahvaćeni sloj mekše faze ( $\alpha$ ),  $H_\alpha$ . Trošena je površina izbrazdana, s prekidima na mjestima gdje se na površini nalaze područja tvrđe faze i čestice trošenja bit će slične kao i kod čiste abrazije, uz povremeno pojavljivanje zrna tvrđe faze kada uslijed trošenja mekše faze, izgube uklještenje i bivaju izbačene iz trošene površine.

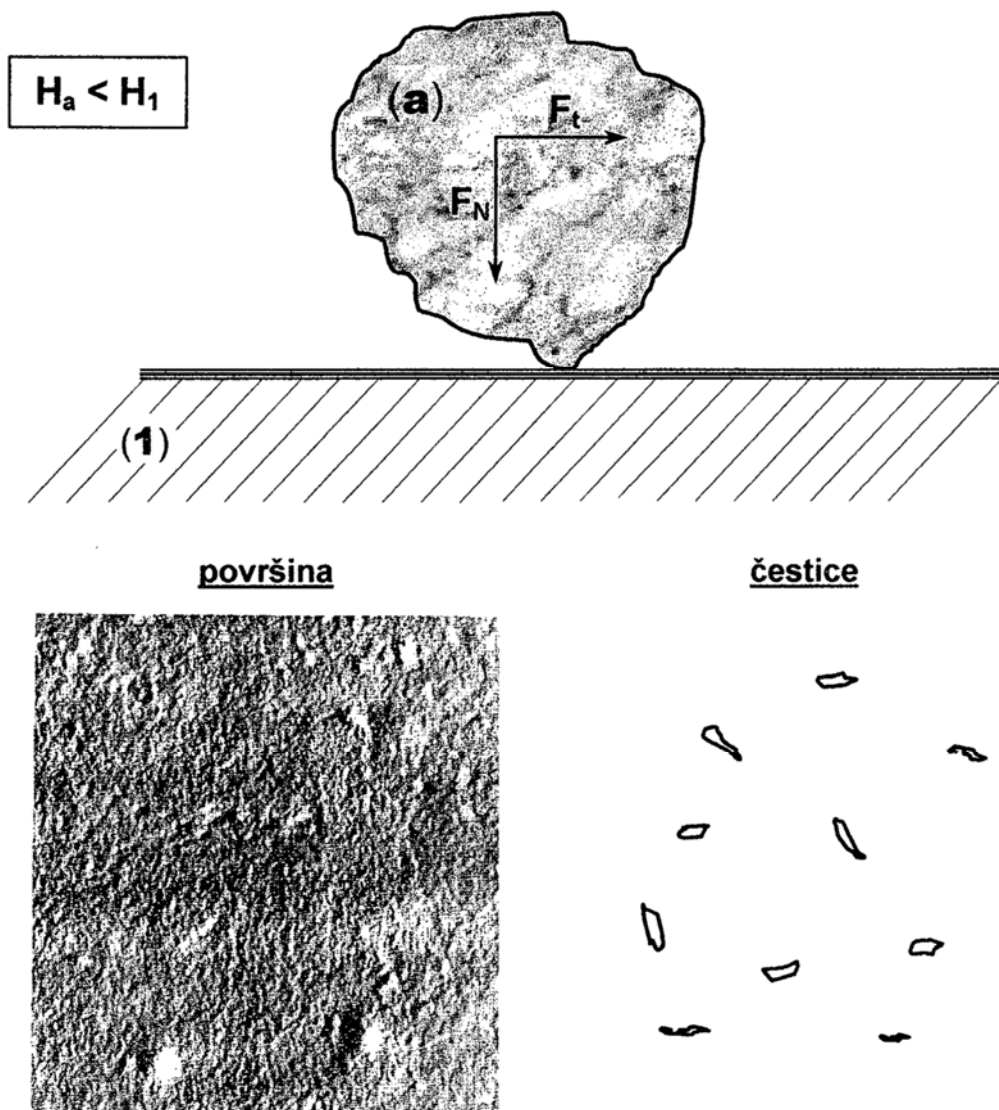


Slika 6 – Selektivna abrazija, [1]



### c) Nulta abrazija

Nastaje kada je cijela abrazivna površina tvrđa od abraziva. Površina ima polirani izgled, a čestice abrazije su sitne ljuskice koje potječu od vanjskog graničnog sloja. Nulta abrazija najčešće se javlja na površinskim slojevima dobivenih raznim postupcima oplemenjivanje površine (boriranje, vanadiranje, PVD, CVD).



Slika 7 – Nulta abrazija, [1]

### **2.3. ČIMBENICI KOJI UTJEČU NA ABRAZIJU**

Na istraživani slučaj trošenja materijala utječe veći broj različitih čimbenika koji se općenito mogu svrstati u tri skupine,[2]:

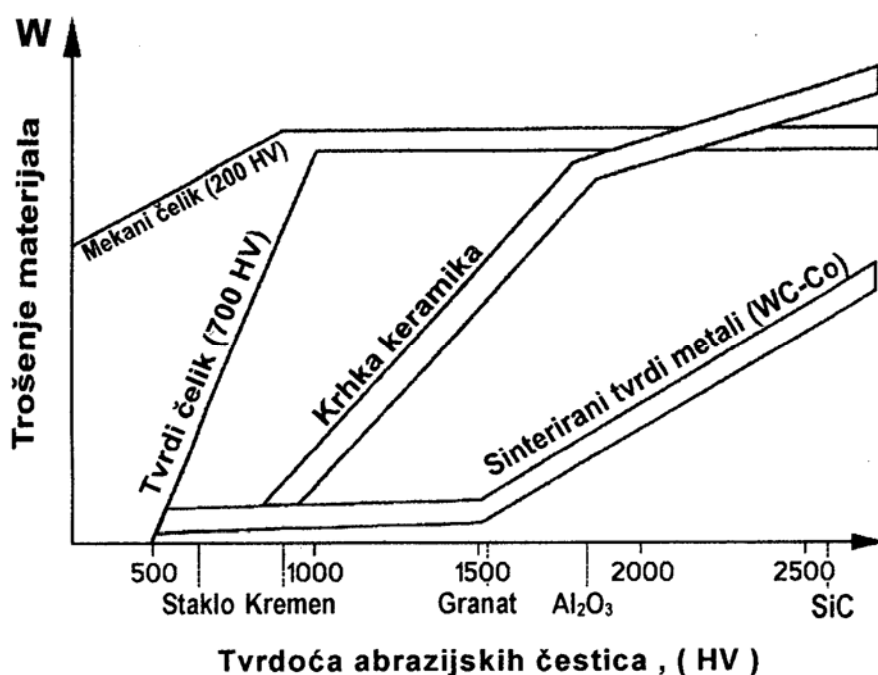
1. svojstva abrazijskih čestica
2. svojstva trošenog materijala
3. radni uvjeti promatranog tribosustava

### 2.3.1. SVOJSTVA ABRAZIJSKIH ČESTICA

Na trošenje materijala utječu sljedeća svojstva abrazivnih čestica:

#### a) Tvrdća abrazivnih čestica

Općenito se može reći da tvrdća abrazivskih čestica utječe na trošenje materijala tako da porastom tvrdoće čestice raste i intenzitet trošenja. Razlog tome je što tvrđe čestice lakše i intenzivnije prodiru u površinu trošenog materijala, stvarajući pri tome veću količinu produkata trošenja. U gotovo svim navedenim istraživanjima također je ukazano na činjenicu da utjecaj tvrdoće abrazivskih čestica na trošenje materijala treba analizirati kroz međusobni odnos tvrdoća trošene površine i abraziva.



Slika 8 – Ovisnost trošenja materijala o tvrdoći abrazivskih čestica, [5]

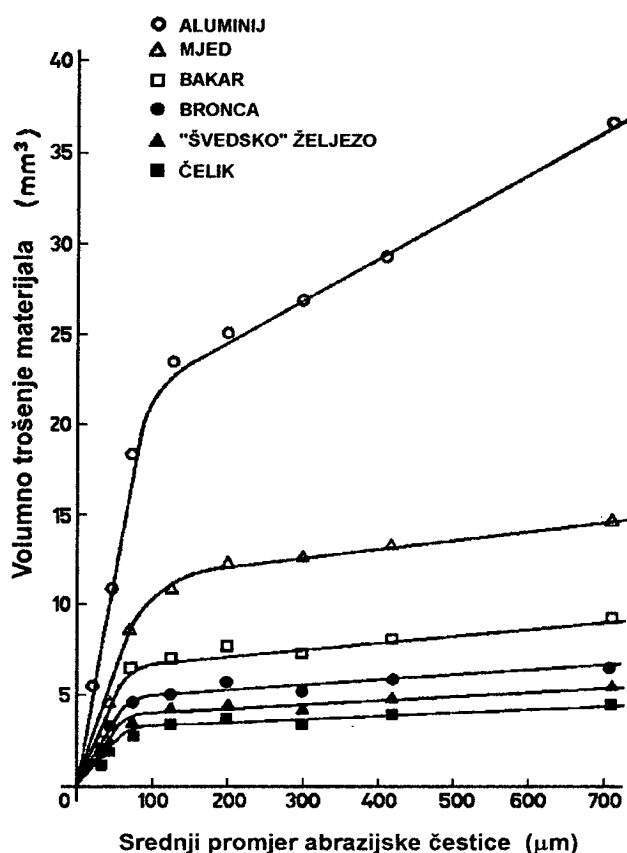
#### b) Oblik abrazivskih čestica

Oblik abrazivske čestice, u prvom redu oština njezinih vrhova i rubova, utječu na trošenje materijala i to tako da čestice oštih rubova intenzivnije prodiru u trošenu površinu i odnose materijal u obliku produkata trošenja. Zaobljene čestice

to čine u značajno manjoj mjeri. Utjecaj oblika je manji kod abrazije u dodiru 3 tijela (eng. 3-body abrasion) nego kod abrazije u dodiru 2 tijela (eng. 2-body abrasion). Razlog tome je što se međučestice kod abrazije u dodiru 3 tijela tijekom gibanja mogu reorijentirati u slobodnom prostoru između funkcionalnih dijelova tribosustava. Takvo reorijentiranje se pretvara u kotrljanje koje nema za posljedicu veće odnošenje materijala s trošene površine. Čestice koje su čvrsto uklještene u površinu jednog funkcionalnog dijela (abrazija u dodiru 2 tijela) nemaju mogućnost reorijentiranja i njihovi oštri rubovi i vrhovi jače odnose materijal s trošene površine [6].

### c) Veličina abrazijske čestice

Na temelju pokusa je zaključeno da je abrazijsko trošenje izravno proporcionalno veličini abrazijske čestice [7]. Utvrđeno je da je kod malih čestica dominantni mikromehanizam trošenja plastična deformacija (mikrobrazdanje), dok veće čestice izazivaju naprsnuća trošene površine [8].



Slika 9 – Utjecaj veličine abrazijske čestice na volumno trošenje materijala, [9]

### 2.3.2. SVOJSTVA TROŠENOG MATERIJALA

Na otpornost abrazijskom trošenju utječe veliki broj svojstava materijala:

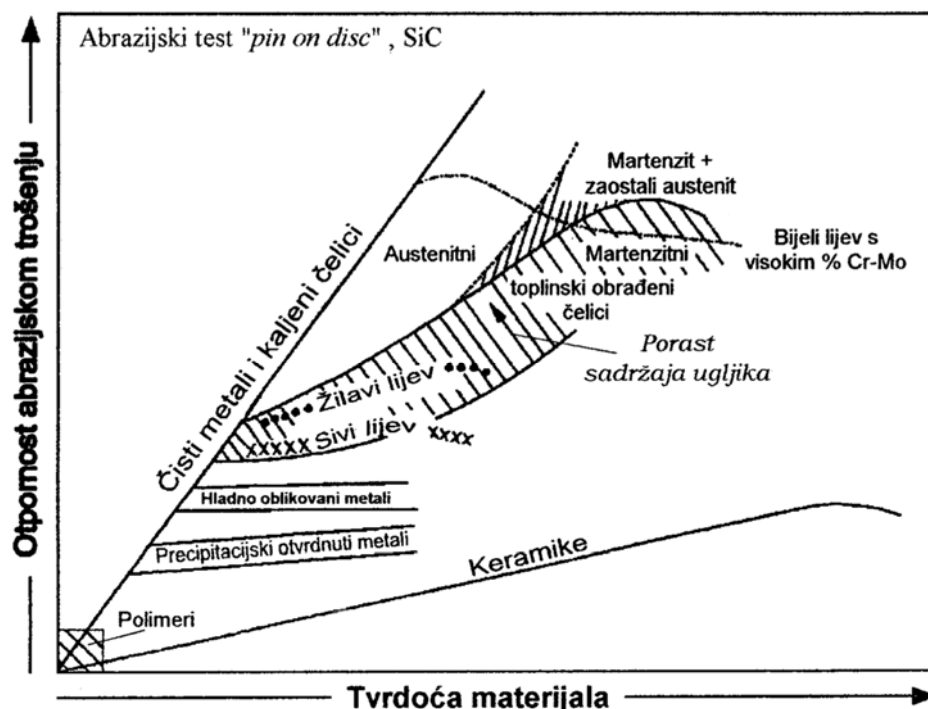
- tvrdoća materijala
- odnos tvrdoća/abraziv
- kohezija
- modul elastičnosti
- interakcija tvrdoća/modul elastičnosti
- žilavost (duktilnost)
- mikrostruktura
- iznos plastične deformacije (veličina čestica trošenja)
- karakter loma (krhki/duktilni)
- kemijska reakcija
- strukturne pretvorbe
- razdioba mikrotvrdoće
- poroznost

Visoki modul elastičnosti te tvrdoća prevlake i osnovnog materijala u kombinaciji s odgovarajućom debljinom prevlake su bitni za trajnost tribosustava.

Od svih nabrojanih svojstava neka se mogu uzeti kao vrlo značajna, dok su pojedina od manjeg značaja. Od navedenih svojstava izrazito značajan utjecaj imaju:

#### a) Tvrdoća trošenog materijala

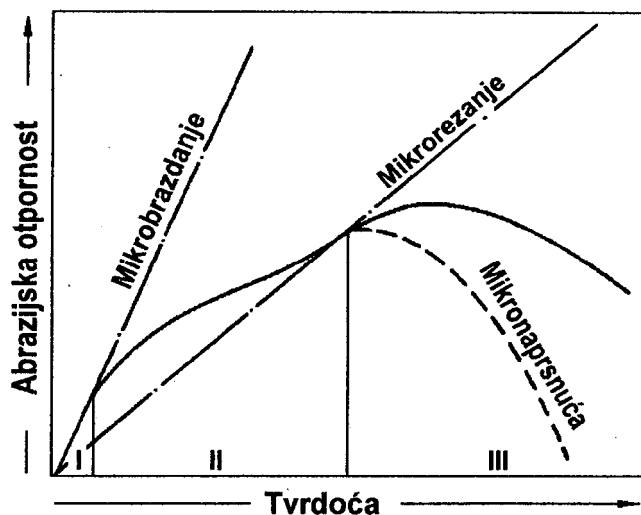
Tvrdoća je jedno od svojstava materijala za koje je utvrđeno da izravno utječe na otpornost abrazijskom trošenju i to na način da s povećanjem tvrdoće raste i otpornost abrazijskom trošenju. Ta ovisnost je različita i određena je vrstom materijala. Za čiste materijale ovisnost otpornosti abrazijskom trošenju i tvrdoće materijala je linearna, dok kod toplinski obrađenih čelika ona ima nelinearni karakter. Ipak unutar pojedinih vrsta materijala može doći do različitih podataka o otpornosti abrazijskom trošenju u ovisnosti o tvrdoći. Primjerice tijekom procesa abrazije trošena površina je izložena jakoj plastičnoj deformaciji koja može uzrokovati otvrdnuće površine, uslijed čega se može promijeniti i otpornost trošenju.



Slika 10 – Otpornost abrazijskom trošenju različitih vrsta materijala, [6]

Utjecaj tvrdoće materijala na otpornost abrazijskom trošenju može se općenito definirati kroz promjenu mikromehanizama trošenja u ovisnosti u promjeni tvrdoće. Počevši od mekih materijala, promjena mikromehanizama trošenja teče uz porast tvrdoće od pretežito mikrobrazdanja do mikrorезanja, te konačno do mikronaprsnuća vrlo tvrdih, tj. krhkih materijala. Promjena iz mikrorезanja u mikronaprsnuća može kod nekih krhkih materijala poput keramike, lijevanog željeza ili vrlo tvrdih čelika, dovesti do smanjenja abrazijske otpornosti unatoč povećanju tvrdoće.

Hoće li doći do promjene od mikrorезanja u mikronaprsnuća ovisi o udarnoj žilavosti i radnim uvjetima tribosustava. Dakle, može se zaključiti da je tvrdoća materijala sama po sebi vrlo utjecajan čimbenik otpornosti abrazijskom trošenju.

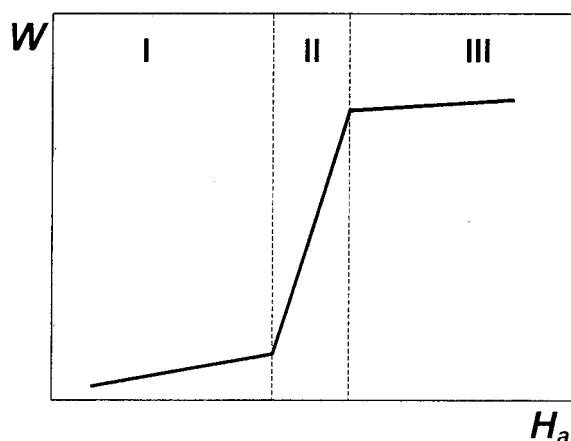


Slika 11 – Ovisnost otpornosti abrazijskom trošenju o tvrdoći materijala, [5]

#### b) Odnos tvrdoća abraziv – trošeni materijal

Otpornost abrazijskom trošenju ovisna je o odnosu tvrdoće abraziv – trošeni materijal zbog toga što je taj odnos odlučujući za prvu fazu jediničnog događaja abrazije, tj. prodiranje abrazijske čestice u površinu trošenog materijala, koja je preduvjet za nastanak početne pukotine i čijim napredovanjem će nastati čestica trošenja.

Utvrđeno je da se, ovisno o odnosu tvrdoća abraziva ( $H_a$ ) i trošenog materijala ( $H_m$ ) mogu definirati tri različita područja trošenja prikazana „S“ krivuljom na slici 12.



Slika 12 – Ovisnost abrazijskog trošenja o tvrdoći abraziva, [10]

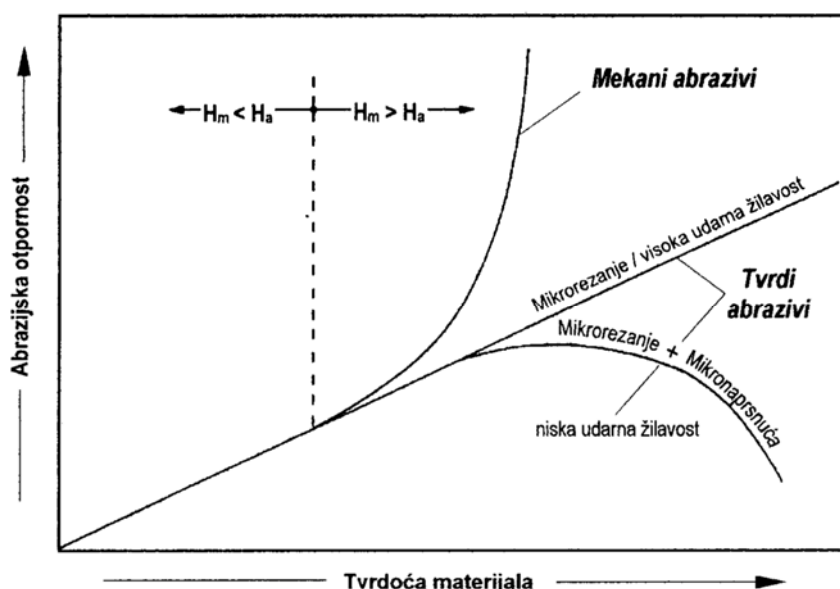
Prikazana područja predstavljaju:

I – područje niskog trošenja – ako je  $H_a < H_m$

II – prijelazno područje – ako je  $H_a$  približno  $H_m$

III – područje visokog trošenja – ako je  $H_a > H_m$

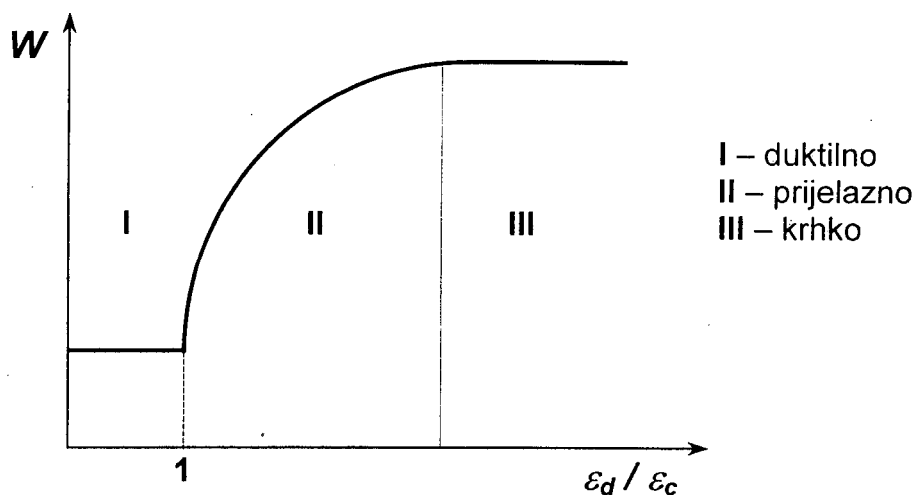
Abrazijska otpornost u području niskog trošenja ( $H_m > H_a$ ) ovisi i o dodatnim uvjetima, u prvom redu udarnoj žilavosti trošenog materijala. Abrazijska otpornost je izrazito visoka ako tvrdoća trošenog materijala nadmašuje tvrdoću abraziva. Ukoliko je pri tome i udarna žilavost trošenog materijala zadovoljavajuće visoka, tada će biti i minimalno abrazijsko trošenje mikrorezanjem.



Slika 13 – Otpornost abrazijskom trošenju u ovisnosti o odnosu tvrdoća  $H_m$  i  $H_a$ , [5]

Kada materijal uz visoku tvrdoću ima nisku žilavost, tj. kada je vrlo krhak, tvrdi mikroabrazivi mogu uz mikrorezanje izazvati i mikronaprsnuća što za posljedicu ima povećano trošenje, odnosno djeluje kao smanjenje abrazijske otpornosti pri povećanju tvrdoće materijala, tj. u uvjetima kada je  $H_m > H_a$ . Način na koji dolazi do loma, tj. napredovanja pukotine u drugoj fazi jediničnog događanja abrazije koja zatim dovodi do stvaranja čestice trošenja, može biti duktilan, krhak ili se odvija umorom površine.

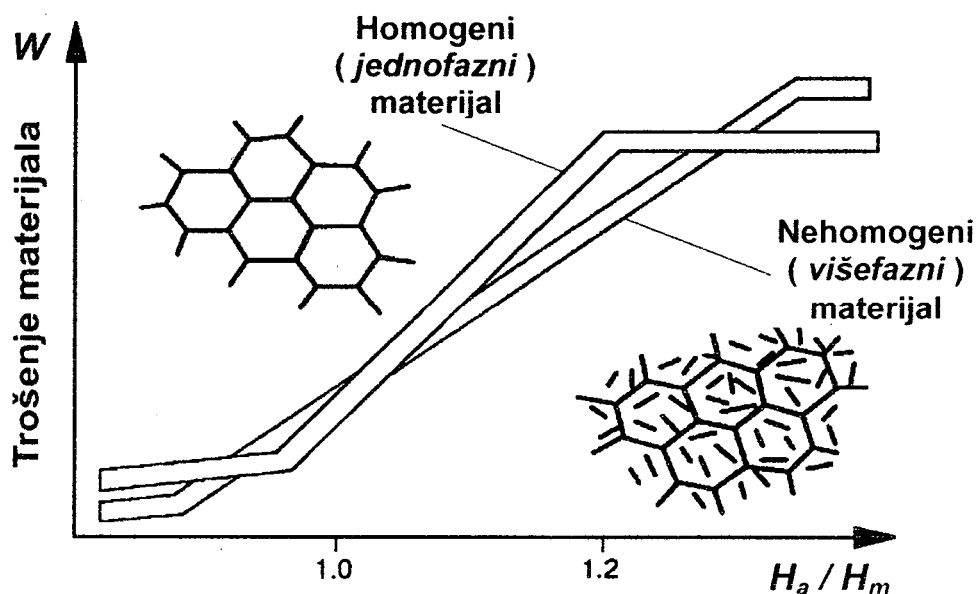




Slika 14 – Ovisnost iznosa trošenja o omjeru stvarne i kritične deformacije, [1]

Kod materijala koji nisu jednofazni nije ispravno kao mjerilo abrazijske otpornosti uzimati tvrdoću dobivenu uobičajenim metodama ispitivanja (Brinell, Rockwell, Vickers) s opterećenjima većim od 10 N. Za postignuće selektivne ili čak nulte abrazije, koje se nastoje ostvariti u praksi jer daju manje iznose trošenja od čiste abrazije, odlučujuća je tvrdoća strukturnih konstituenata ili površinskih slojeva, koja se mjeri opterećenjima manjim od 10N i uobičajeno se naziva mikrotvrdoća.

Prijelaz s niske na visoku razinu trošenja kod jednofaznih, tj. homogenih materijala počinje kada je tvrdoća abraziva jednaka tvrdoći trošenog materijala. Kod višefaznih, tj. nehomogenih materijala prijelaz s niske na visoku razinu trošenja odvija se u širem području omjera tvrdoća abraziva i materijala. On počinje kada je tvrdoća abraziva jednaka tvrdoći matrice, a završava kada se tvrdoća abraziva izjednači s tvrdoćom najtvrdih faza.



Slika 15 – Ovisnost abrazijskog trošenja o odnosu tvrdoća abraziv-trošeni materijal za višefazne materijale, [6]

Utjecaj odnosa tvrdoća abraziva – tvrdoća materijala nemoguće je potpuno analizirati samostalno, bez uzimanja u obzir činjenice da postoji istovremeno miješanje utjecaja, tj. interakcije drugih svojstava materijala na abrazijsko trošenje.

### c) Mikrostruktura trošenog materijala

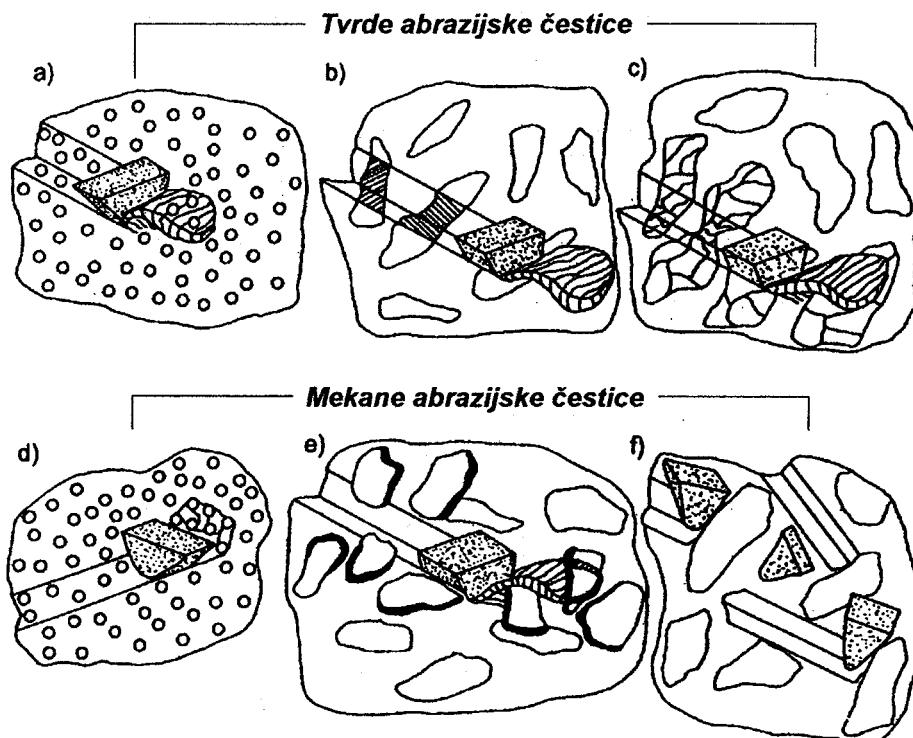
Najznačajniji utjecaj na promatrani slučaj abrazijskog trošenja imaju sastav mikrostrukture i tvrdoće strukturnih konstituenata, odnosno, njihove mikrotvrdoće. Temeljnu mikrostrukturu materijala određuju sastav i parametri proizvodnje. Takvi proizvodi, u principu poluzavršeni, dodatno se podvrgavaju različitim mehaničkim, toplinskim ili toplinsko-mehaničkim postupcima koji definiraju završnu mikrostrukturu.

Kod heterogenih mikrostrukture najčešće je slučaj da su tvrdi konstituenti (uglavnom različiti karbidi) disperzirani u mekšoj matrici pri čemu je tvrdoća materijala veća od tvrdoće matrice i manja od tvrdoće tvrdih konstituenata.

Otpornost abrazijskom trošenju kod različitih materijala temelji se upravo na prisustvu tvrdih karbida u njihovoj mikrostrukturi. Pri tome se takvi materijali razlikuju prema vrsti, obliku i udjelu tj. volumnom sadržaju karbida u ukupnom sastavu mikrostrukture. Udio karbida kreće se od 18% kod komercijalnih alatnih čelika do

45% ukupnog volumena kod bijelog lijeva legiranog s kromom.

Općenito, utvrđeno je da na abrazijsku otpornost veliki utjecaj imaju veličina i oblik karbidnih zrna, te njihova vezanost u matrici materijala. Ovisno o odnosu tvrdoća abraziva i karbida vezanih u matrici materijala, te njihovih veličina, proces abrazijskog trošenja, odnosno razaranja trošene površine, može se odvijati u obliku vezanja karbidnih zrna, njihovog vađenja iz matrice ili njihovog lomljenja.



Slika 16 – Međusobno djelovanje abraziva i karbida u procesu trošenja, [6]

Čestica tvrdog abraziva može lako iskopati sitna karbidna zrna (a). Krupna karbidna zrna tvrdi abrazivni čestici može rezati ako su duktilna (b) ili lomiti ako je karbid krhak (c). Čestica mekog abraziva može također iskopati sitna karbidna zrna (d), ali samo ako je abrazijska čestica krupnija od karbidnog zrna. Ako su karbidna zrna krupnija, mekša abrazijska čestica može rezati samo mekanu matricu materijala i djelomično pomaknuti zrna (e), dok kod izrazito krupnih zrna utjecaj mekših abrazijskih čestica ograničen je isključivo na mekanu matricu između karbidnih zrna koja tada ne mogu biti pomaknuta (f).

Porast veličine karbidnih zrna povećava i abrazijsku otpornost matrice jer krupnija zrna pružaju veći otpor prodoru abrazijskih čestica u trošenu površinu, međutim, utjecaj veličine karbida ne može se promatrati neovisno o njihovom slobodnom putu, odnosno srednjem razmaku između karbidnih zrna. Slobodni put karbida se smatra važnim čimbenikom abrazijske otpornosti materijala tako dugo dok karbidna zrna nisu razorena djelovanjem abraziva. Takav utjecaj naročito dolazi do izražaja kod trošenja mineralnim abrazivima koji su mekši od karbida u trošenoj površini, pri čemu iznos trošenja izravno ovisi o odnosu srednjeg slobodnog puta i veličine karbida. Ovom odnosu pridružuje se i utjecaj veličine abraziva, na taj način da abrazijske čestice krupnije od srednjeg slobodnog puta karbida ne uspijevaju značajnije prodrijeti u mekšu matricu i time ostvariti proces trošenja. Dakle, općenito se može reći da se s porastom veličine karbida, njihova udjela u ukupnom volumenu i većom tvrdoćom smanjuje i abrazijsko trošenje, odnosno raste abrazijska otpornost.

Ispitivanjem je utvrđeno da grubi i nepravilni karbidi imaju i do 10 puta veću otpornost od finih karbida [11]. Velik utjecaj ima i morfologija karbida. Kod lijevane strukture karbidi su umreženi i samim time bolje vezani s matricom. Takva čvrsta veza onemogućuje vađenje, tj. izbacivanje karbidnih zrna iz mekše matrice materijala prodiranjem abrazijskih čestica. Kod plastično oblikovane strukture karbidi su usmjereni tijekom oblikovanja čime im je mreža deformirana i prekinuta, što je rezultiralo smanjivanjem njihove veličine i omogućavanjem lakšeg vađenja iz matrice pri prodiranju abrazijskih čestica. Općenito, karbidi se mogu lakše izvaditi iz mekane matrice prodiranjem abrazijskih čestica u površinu plastično oblikovanih materijala nego u površinu lijevanih materijala. Dakle, abrazijska otpornost ovisi o jakosti veze karbida u mekanoj matrici materijala, pri čemu su veći i nepravilniji karbidi jače vezani od manjih i zaobljenih karbida.

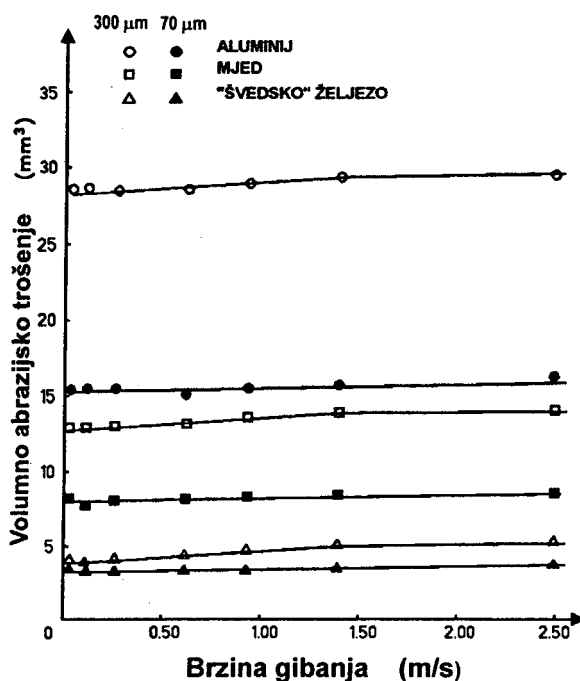
### 2.3.3. RADNI UVJETI PROMATRANOG TRIBOSUSTAVA

Radni uvjeti definirani su parametrima gibanja i opterećenja tribosustava, te djelomično i parametrima kontakta okoline s dijelovima tribosustava. U tribosustavu istraživanog slučaja trošenja pri gibanju slobodnih abrazivskih čestica najvažniji su parametri brzina gibanja i kut sudara abrazivskih čestica s trošenom površinom.

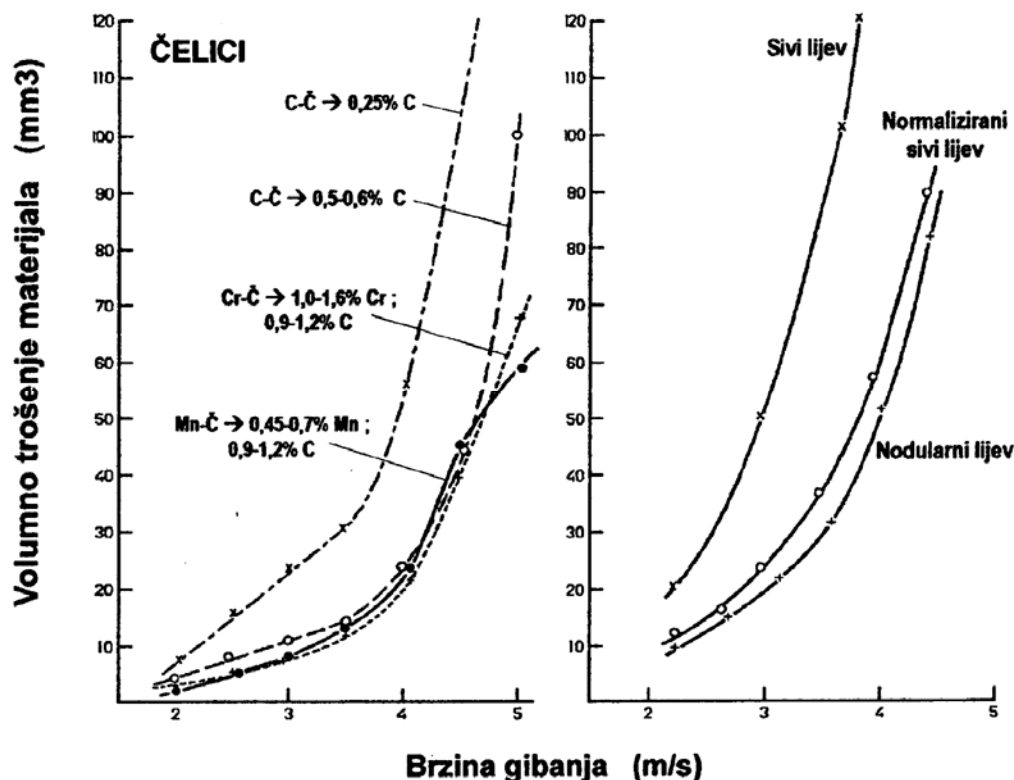
#### a) Utjecaj brzine gibanja

Utjecaj brzine gibanja različiti autori različito tumače. Nathan i Jones [9] su zaključili da je taj utjecaj vrlo malen, gotovo neznatan.

Većina pak istraživanja poput onog Daviesa [12] koji je izvodio gibanje uzoraka u masi slobodnih čestica oštrog pijeska brzinama od 2-5 m/s, pokazala su izrazito velik utjecaj brzine gibanja na veličinu abrazivskog trošenja, koja se može povećati i do 1000% [13].



Slika 17 – Utjecaj brzine gibanja na abrazivsko trošenje materijala, [9]

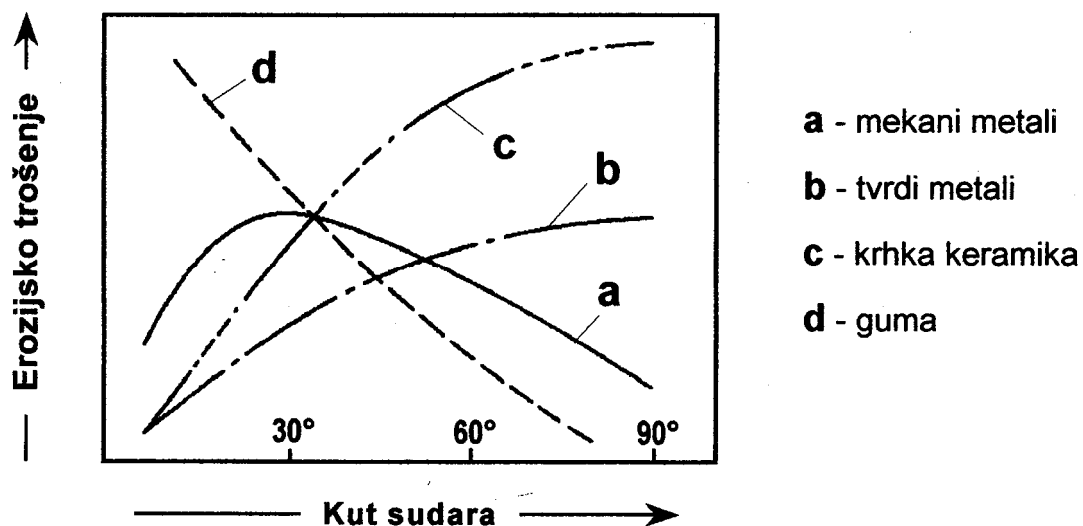


Slika 18 – Utjecaj brzine gibanja na abrazijsko trošenje čelika i željeznih ljevova, [12]

Utjecaj brzine gibanja je manje izražen kod mekših, tj. duktilnijih materijala, poput bakra (kod kojeg taj utjecaj gotovo i ne postoji), dok je kod tvrdih materijala, poput kaljenog čelika, taj utjecaj bitno izraženiji.

#### b) Utjecaj kuta sudara

Utvrđeno je da oštre abrazijske čestice odnose materijal s trošene površine mikrobrazdanjem i/ili mikrorezanjem pri malim kutevima sudara koji su ovisno o vrsti trošenog materijala, uglavnom manji od  $40^\circ$ , [14,15,16].



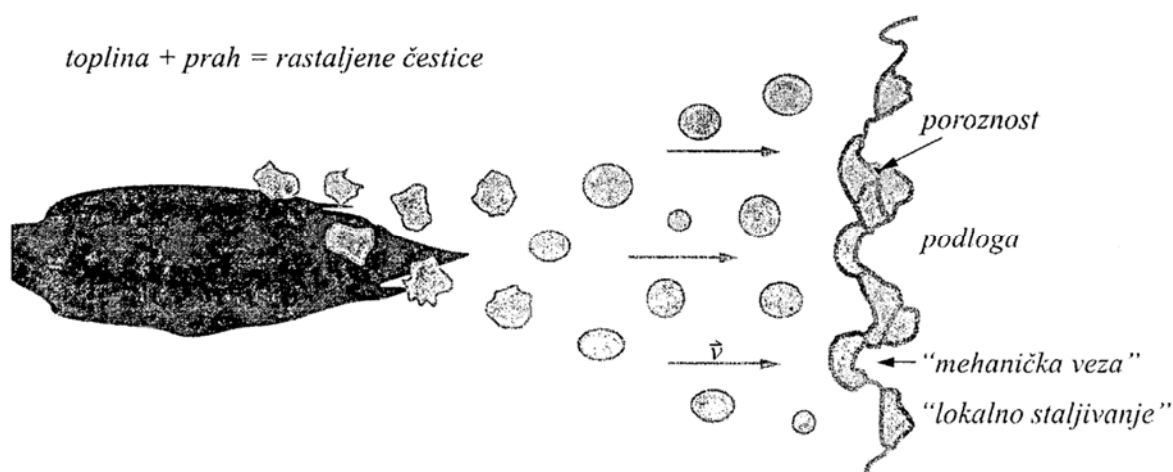
Slika 19 – Utjecaj kuta sudara na erozijsko trošenje krutim česticama, [2]

Može se zaključiti da je za kuteve sudara abraziva i trošenog materijala manje od 30° dominantan mehanizam trošenja abrazija dok za kuteve veće od 30° dominira erozija česticama. Na slično je ukazao i Ivušić [1] sa zaključkom da pri izboru materijala otpornih eroziji česticama za manje kuteve, tj. za kutove do 30° vrijede načela izbora materijala otpornih abraziji. Utjecaj kuta sudara krutih čestica s trošenom površinom prikazan je na slici 19.

### 3. PLINSKO (PLAMENO) NAŠTRCAVANJE

#### 3.1. ZNAČAJKE PLINSKOG (PLAMENOG) NAŠTRCAVANJA

Plinsko ili plameno naštrcavanje (eng. Flame spaying) se ubraja u skupinu toplinsko-mehaničkih postupaka prevlačenja površine. Danas se pod pojmom naštrcavanja podrazumijevaju svi postupci u kojima se polazni materijal sloja djelomično ili u potpunosti tali unutar ili izvan uređaja za naštrcavanje, a zatim se rastaljene ili omekšane čestice ubrzavaju i nanose na površinu podloge i oblikuju sloj,[23].



Slika 20 – Slikoviti prikaz postupka naštrcavanja, [17]

Plinsko je naštrcavanje najstariji postupak toplinskog naštrcavanja. To je postupak koji za taljenje materijala od kojega nastaje sloj koristi toplinsku energiju nastalu izgaranjem gorivog plina u kisiku. Ubrzanje rastaljenih pločica prema podlozi postiže se pomoću plinova izgaranja ili komprimiranog zraka. Polazni materijal može biti u obliku žice, šipke ili praha. Postupkom plinskog naštrcavanja mogu se nanijeti polimeri, metalni, keramički i kompozitni slojevi.

Plinsko se naštrcavanje dijeli na naštrcavanje malim i velikim brzinama. U naštrcavanje velikim brzinama ubrajaju se postupci naštrcavanja detonacijskim pištoljem i naštrcavanje velikim brzinama čestica (eng. high velocity oxy fuel spraying, HVOF). Plinsko naštrcavanje malim brzinama je zapravo naštrcavanje

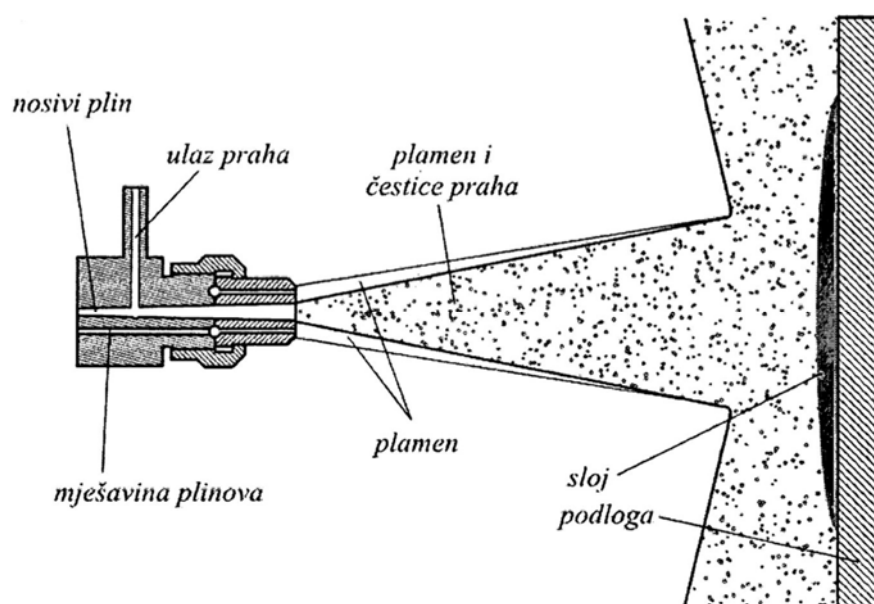


plamenom ili skraćeno plinsko naštrecavanje, te se dijeli na hladni (oko 200 °C) i topli (oko 1000 °C) postupak plinskog naštrecavanja.

Postupak plinskog naštrecavanja često se primjenjuje s ciljem povišenja otpornosti na trošenje i koroziju. Primjenom ovog postupka na istrošene dijelove, ali i prilikom zaštite od trošenja novih dijelova, značajno se produljuje vijek trajanja. Zbog velikog broja mogućih materijala, slojeva i podloga na koje se slojevi mogu nanositi, postupci plinskog naštrecavanja danas se primjenjuju u gotovo svim granama industrije.

Jedna od prednosti ovog postupka je da se slojevi mogu nanositi na mjestu eksploatacije nekoga dijela, primjena im nije ograničena veličinom podloge na koju se nanosi, a mogu se nanositi i relativno debeli slojevi. Postupak plinskog naštrecavanja ima prilično niske troškove nanošenja slojeva. Plameno naštrecavanje praha se primjenjuje kod razmjerno niskih zahtjeva na sloju. Zagrijavanje čestica, hlađenje, skrućivanje i naknadna obrada nisu složeni procesi.

Glavni su nedostaci ovog postupka relativno loš koeficijent iskorištenja materijala za naštrecavanje, kao i velika buka, prašina i dim pri izvođenju postupka.



Slika 21 – Shematski prikaz postupka plinskog naštrecavanja, [17]

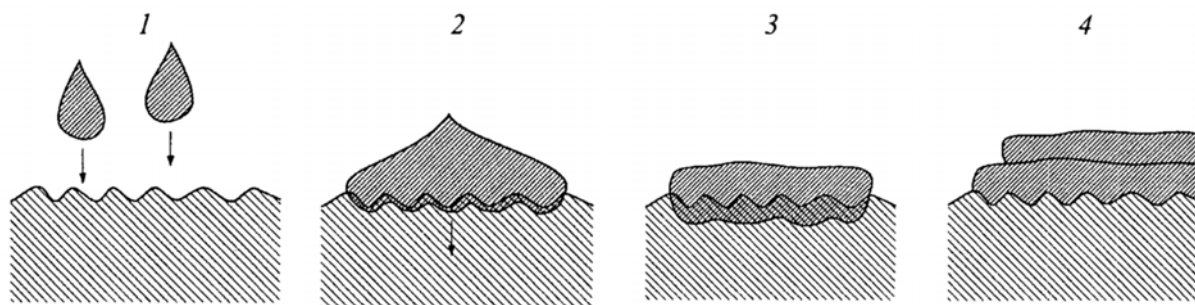
### **3.2. POSTUPAK HLADNOG PLINSKOG NAŠTRCAVANJA**

Kod hladnog postupka plinskog naštrcavanja, temperature na površini dodira podloge i sloja su niske (oko 200°C) te je mehanička veza najčešći oblik prijanjanja sloja na podlogu. Čak se i lako zapaljivi materijali poput drveta i polimera mogu koristiti kao podloga, zato što su temperature na mjestu dodira sloja i podloge od 100° C do maksimalno 280° C.

Rastaljene ili djelomično rastaljene čestice materijala sloja ne tale materijal podloge prilikom dodira, nego dolazi samo do blagog zagrijavanja podloge, a to je jedna od glavnih prednosti hladnog postupka plinskog naštrcavanja. Stoga ovaj postupak obično nema utjecaja na prethodnu toplinsku obradu ili kemijski sastav podloge. Nakon udara rastaljenih ili djelomično rastaljenih čestica u površinu podloge čestice se spljošte, hlade i skrutnjavaju oblikujući tako sloj najčešće lamelarne strukture.

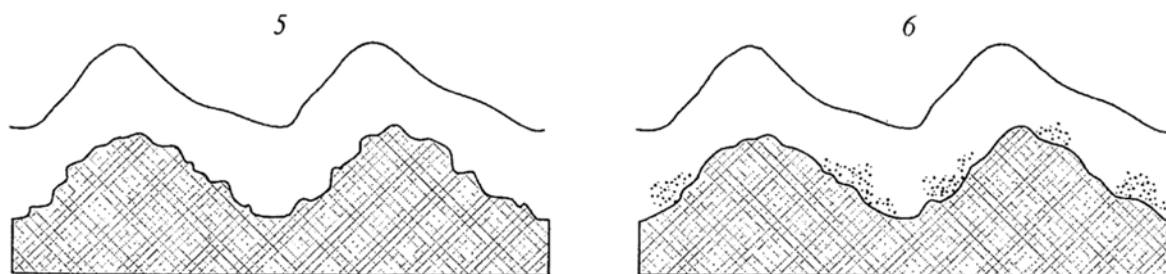
Kvaliteta naštrcanih slojeva ovisi o jačini veze između sloja i podloge (čvrstoći prijanjanja). Za vrijeme brzog skrutnjavanja naštrcanih čestica, između podloge i čestica uspostavlja se veza zbog mehaničkog spajanja, adhezije, difuzije i kemijskih reakcija. Mehanička veza je najčešći oblik prijanjanja sloja na podlogu. Mehanizmi adhezije prisutni su na razinama mikrododira između samih čestica sloja i površine podloge. Radi se o Van der Wallsovim silama.

Iz tog razloga podloga se prethodno mora pažljivo pripremiti kako bi se odstranila onečišćenja, vlaga, korozija, itd. Nakon čišćenja podloge potrebno ju je ohrapaviti kako bi se osigurala prionjivost. To se najčešće radi pjeskarenjem ili tokarenjem. Nakon toga postupak naštrcavanja mora što ranije početi da ne bi došlo do ponovnog onečišćenja podloge. Ovaj postupak ima poprilično niske troškove nanošenja slojeva, a količina depozita je od 5 do 8 kg/h, ovisno o polaznom materijalu. Postizive debljine slojeva iznose od 10 µm do nekoliko milimetara što ovisi o primijenjenom dodatnom materijalu i postupku naštrcavanja. Debljina sloja ovisi o profilu zahtjeva na sloj. Primjerice kod slojeva za toplinsku zaštitu traži se najdeblji mogući sloj, a u slučaju zaštite od trošenja dovoljan je tanki sloj.



#### NASTAJANJE SLOJA

- 1 – rastaljene čestice na putu prema podlozi
- 2 – udar rastaljene čestice u podlogu
- 3 – prijelaz topline na materijal podloge
- 4 – skrutnjavanje i skupljanje sloja uslijed hlađenja



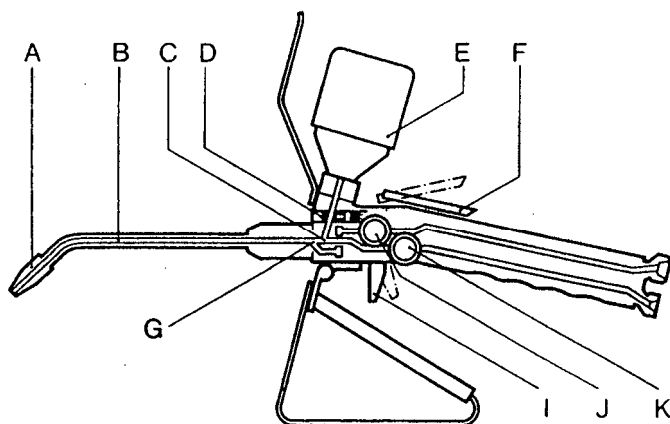
#### MEHANIZMI VEZANJA SLOJA I PODLOGE

#### MEHANIZMI VEZANJA SLOJA I PODLOGE

- 5 – mehanička veza
- 6 – lokalno zavarivanje

Slika 22 – Shematski prikaz nastajanja sloja, [17]

Plinsko ili plameno naštrecavanje provodi se pomoću posebnog pištolja. Kod ovog postupka prah i smjesa plinova (acetilen i kisik) mješaju se u samom pištolju (prikazanom na slici 23) i iz plamenika izlaze kao plamen.



Slika 23 – Shematski prikaz pištolja za plinsko naštrecavanje, [17]

Objašnjenje uz sliku 23:

- A – mlaznica plamenika
- B – izmjenjivi umetak plamenika
- C – usisavanje praha
- D – ventil za dovod praha
- E – spremnik za prah
- F – poluga za prah
- G – prostor u kojem se miješa plin
- I – ventil za brzo zatvaranje
- J – ventil za regulaciju acetilena
- K – ventil za regulaciju kisika

### **3.3 KARAKTERISTIKE SLOJA**

Otpornost na trošenje sustava podloga/sloj ovisit će uglavnom o svojstvima sloja sve dok sloj u potpunosti prekriva površinu kontakta. Kada se sloj počne parcijalno trošiti ili kada je podloga izložena adhezijskom oštećenju ili pukotinama tada i svojstva podloge postaju značajna.

Većina naštrcanih slojeva je po svojim strukturama jako daleko od nekog termodinamički stabilnog stanja obzirom da se radi o velikim brzinama nanošenja i hlađenja, te je u strukturi uvijek prisutan velik broj nepravilnosti, stoga je za ovakve slojeve dosta teško predvidjeti njihovo ponašanje u eksploatacijskim uvjetima. Toplinska obrada podloge se mora izvršiti prije postupka naštrcavanja i mora odgovarati željenom toplinski obrađenom stanju gotovog obratka. Nitrirane i pouglijčene podloge ne mogu se prevlačiti.

Povećanjem debljine sloja će se produljiti vijek trajanja sve dok je brzina trošenja postupna. Međutim debljina sloja je ograničena zbog zaostalih naprezanja koje se javljaju tijekom postupka prevlačenja. Stoga je sloj uvijek jako tanak u usporedbi s dopuštenom dubinom trošenja. Zbog toga uz zadovoljavajuću adheziju i otpornost prema pukotinama i raslojavanju sloj mora biti ekstremno otporan na trošenje kako bi se značajno poboljšala tribološka svojstva sustava podloga/sloj.

Odvajanje sloja od podloge dogodit će se u slučaju djelovanja naprezanja većih od čvrstoće veze između sloja i podloge. Čvrstoća veze izravno je povezana s adhezijom. Mehanizmi spajanja na granici sustava podloga/sloj kao između samih čestica sloja mogu se podijeliti na:

- mehaničko spajanje
- difuzijsko spajanje
- drugi difuzijski mehanizmi adhezije, kemijsko ili fizikalno spajanje (oksidni filmovi, Van der Waalsove sile, itd.)

Faktori koji utječu na čvrstoću veze između sloja i podloge su:

- čistoća podloge
- veličina površine podloge
- toplinska energija
- vrijeme (brzina reakcije i brzina hlađenja)
- brzina rastaljenih čestica (kinetička energija)
- fizikalna i kemijska svojstva sloja i podloge
- fizikalne i kemijske reakcije

Čišćenje i ohrapljavanje površine podloge su važni za pripremu podloge, jer se dobije fizikalno i kemijski aktivnija površina potrebna za dobro spajanje podloge i sloja. Površina mora biti tehnički čista. Odmašćivanje se najčešće provodi ugrijavanjem, ultrazvukom ili mlazom pare.

Većom hrapavosti površine postiže se veća površina vezanja, a time i veća čvrstoća veze podloga/sloj. Ohrapavljenje površine podloge poboljšat će mehaničku vezu između sloja i podloge. Najčešće primjenjivani postupak je pjeskarenje dok se koriste i električno ohrapavljenje i tokarenje. Ohrapavljenje površine treba obaviti neposredno prije prevlačenja i stoga ga u pravilu obavlja onaj koji i nanosi prevlaku.

Brzine ohlađivanja rastaljenih čestica su velike, pa je i vrijeme za difuziju kratko tako da se baš i ne može govoriti o uspostavljanju difuzijske veze. Zbog niske temperature postupka također se ne može govoriti ni o uspostavi nekakve kemijske veze između sloja i podloge. Zbog toga se može zaključiti da su veze između sloja i podloge u našem slučaju samo mehaničke i adhezijske. Čvrstoća prianjanja oksidno-keramičkih slojeva je općenito niža od čvrstoće prianjanja metalnih karbida ili metalnih slojeva. Posebno treba voditi računa o velikoj razlici svojstava između materijala oksidno-keramičkih slojeva i većine metalnih osnovnih materijala.

Keramički (oksidni) slojevi se zbog visoke tvrdoće i toplinske stabilnosti upotrebljavaju kao zaštitni toplinski slojevi (eng. Thermal barrier coatings, TBC) i slojevi otporni na trošenje i koroziju. Najširu primjenu ima  $\text{Al}_2\text{O}_3$  i  $\text{TiO}_2$ . Općenito keramički slojevi imaju visok stupanj poroznosti, što se može poboljšati legiranjem različitim oksidima. Kako bi se postigla zadovoljavajuća čvrstoća veze, materijali podloge se ohrapvljuju ili prevlače vezivnim slojem (najčešće spojevima Ni i Cr).

Porozni slojevi se zaštićuju slojevima polimernih materijala kako bi im se poboljšala otpornost na koroziju. Oksidne keramike pogodne za plinsko naštrecavanje kao što je  $\text{Al}_2\text{O}_3$  imaju  $t_{\text{taljenja}} \leq 2500^\circ \text{C}$ , a primjenjuju se u općem strojarstvu; čeličnim konstrukcijama kao valjci, žljebovi, utori, vodilice, ventili, u industriji stakla kod kalupa, kemijskoj industriji kod ležišta ventila, brtvi, u automobilskoj industriji kod ležišta ventila i kod obrade polimera kod kalupa za ekstrudiranje. Odlična kemijska otpornost oksidnih vrsta keramika omogućuje primjenu u zaštiti od trošenja u kemijskoj industriji i prehrambenoj industriji. Glavna područja primjene  $\text{Al}_2\text{O}_3$  slojeva je zaštita od trošenja i električna izolacija. Značajno područje primjene je u tiskarskoj, industriji papira i industriji strojeva za tekstilnu industriju. Osim toga oksidno–keramičke prevlake često imaju biokompatibilna svojstva što im omogućuje primjenu u medicinskoj tehnici.

Keramički materijali u usporedbi s metalima često imaju bolju otpornost na koroziju, oksidaciju i trošenje. Većina tih materijala podnosi više temperature procesa te su većinom dobri toplinski i električni izolatori. Odlična kemijska otpornost oksidnih vrsta keramika omogućuje primjenu u zaštiti od trošenja u kemijskoj i prehrambenoj industriji.

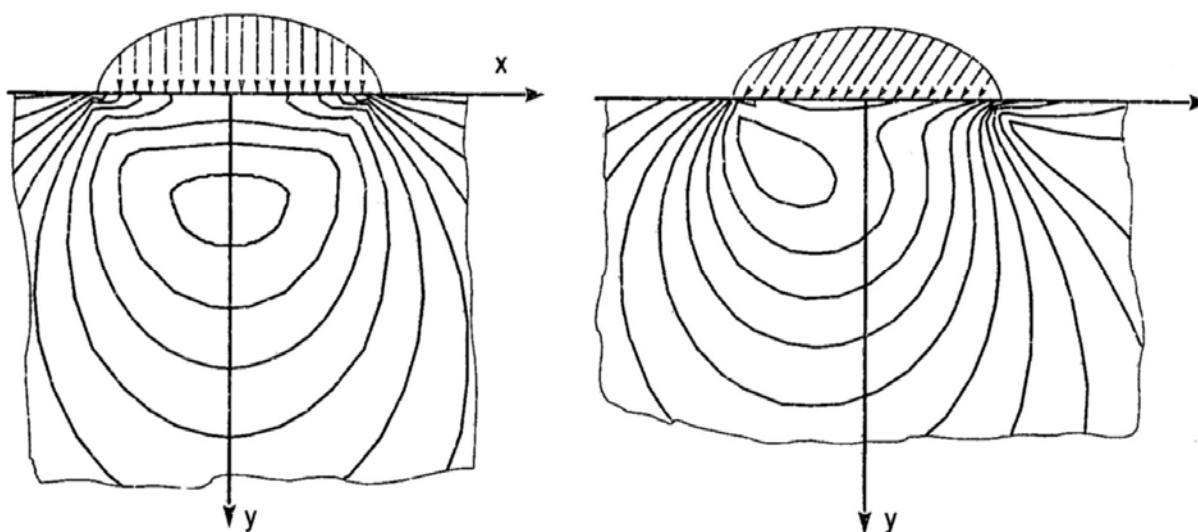
Naštrecane oksidne keramike u pravilu se mogu naknadno obrađivati brušenjem radi postizanja željenih dimenzija i kvalitete površine. Njihova otpornost na stvaranje napuklina i prema širenju napuklina je izrazito niska.

Prevlake mogu biti,[19]:

- jednokomponentne
- više komponentne (legirane)
- višeslojne
- stupnjevite
- kompozitne
- višefazne

### 3.4. UTJECAJ PODLOGE

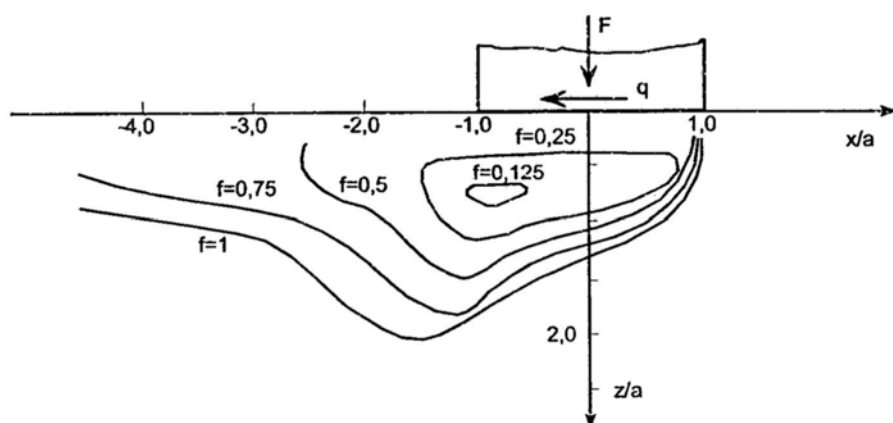
Poznato je da pri teoretskom (Hertzovom) opterećenju mjesto pojave maksimalnog naprezanja nije na površini materijala, već na određenoj udaljenosti ispod nje. Kod kliznog dodira kakav se pojavljuje kod abrazije, naprezanja koja se javljaju rezultat su kombiniranog utjecaja vanjskog opterećenja i trenja te se vrijednost maksimalnog naprezanja u odnosu na normalno opterećenje povećava i pomiče prema prednjem rubu dodira i prema površini, kao što je vidljivo na slici 24.



Slika 24 – Linije jednakog intenziteta naprezanja u jednorodnom materijalu kod normalnog i kliznog dodira, [18]

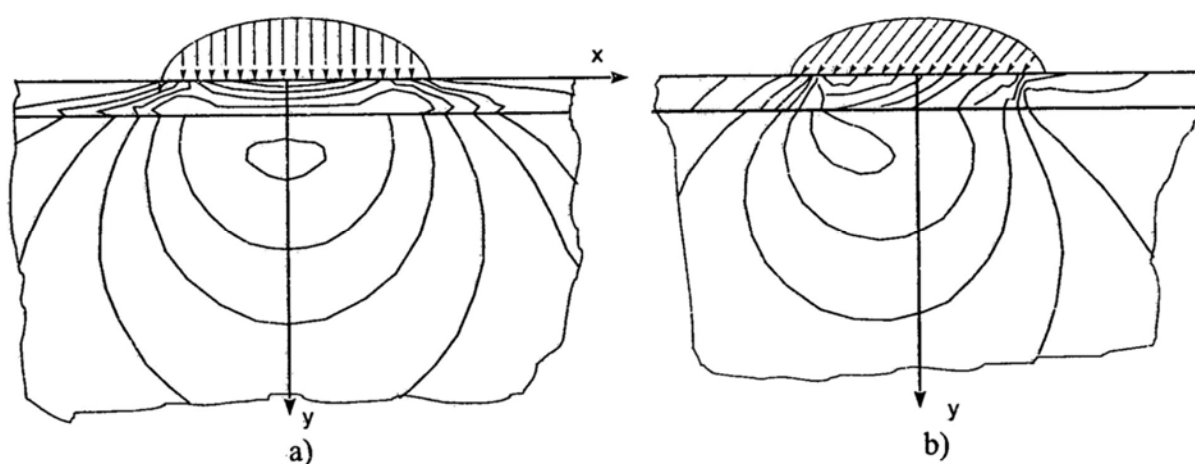
Kod vrijednosti faktora trenja  $\mu = 0,3$  maksimalno naprezanje se javlja na površini materijala i tamo dolazi do tečenja materijala što rezultira pojavom brazdi na površini materijala. Naime maksimalno naprezanje kod dodira abraziva i uzorka javlja se ili na površini materijala ili na nekoj dubini. Dubina ovisi o obliku i veličini abraziva, opterećenja i faktora trenja.





Slika 25 – Raspored maksimalnih naprezanja u uvjetima kliznog dodira za jednako opterećenje i različite faktore trenja, [18]

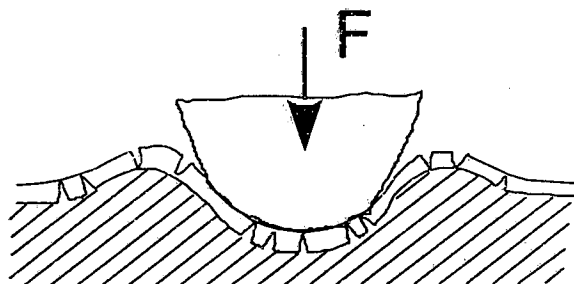
U tribosustavima gdje se umjesto jednorodnih materijala koriste tribološke prevlake, analize naprezanja u prevlaci i podlozi pokazuju drugačije konture i uzorke od onih kod jednorodnih materijala, kao što se vidi na slici 26.



Slika 26 – Linije jednakog intenziteta naprezanja u materijalu s prevlakom kod:  
a) normalnog dodira, b) kliznog dodira, [18]

Što je površina tvrdja i kruća sposobnija je podnijeti veće naprezanje i akumulirati više plastične deformacije. Pokazalo se da uz tvrdoću izuzetnu važnost na trajnost tribosustava ima debljina prevlake i interakcija između nje i tvrdoće podloge. Kod vrlo tankih prevlaka, vrijednost maksimalnog naprezanja pada ispod prevlake u podlogu. U tom slučaju prevlaka sama ne podnosi opterećenje već trajnost tribosustava ovisi o karakteristikama podloge, njenoj tvrdoći i krutosti. Ukoliko je podloga mekana dolazi do njene deformacije i pojave brazdi. Deformacije podloge

uzrokuju deformacije materijala prevlake i njenog pucanja, do pojave tzv. «egg shell».



Slika 27 – Pucanje prevlake uslijed deformacije podloge, [18]

S porastom debljine prevlake, maksimalno naprezanje raste i pomiče se prema površini materijala. Najgora mogućnost predstavlja slučaj kada maksimalno naprezanje padne u spoj prevlake i podloge. Obzirom da na tom mjestu postoje zaostala toplinska naprezanja i da su skoro uvijek prisutne nečistoće i nepravilnosti tada koncentracija naprezanja može dovesti do odvajanja prevlake. Stoga možemo doći do zaključka da trajnost tribosustava ne ovisi samo o svojstvima i materijalu prevlake nego i o tvrdoći podloge, jer što je podloga tvrđa prevlake su trajnije.

## 4. EKSPERIMENTALNI DIO

Za eksperimentalno određivanje otpornosti na abrazijsko trošenje postoji niz uređaja i metoda. U ovom ispitivanju otpornosti na abrazijsko trošenje koristili smo test «suhi pijesak/gumeni kotač»

U ovom radu ispitana je otpornost na abrazijsko trošenje plameno naštrcanih (eng. flame spraying)  $\text{Al}_2\text{O}_3$  prevlaka. Prevlake su nanošene nisko-temperaturnim plamenim naštrcavanjem na osnovni materijal od čelika. Za potrebe ovog ispitivanja pripremljene su čelične podloge različite hrapavosti, a sam postupak neštrcavanja izveden je u dvije varijante.

Ovi postupci su izvedeni u svrhu ispitivanja i uspoređivanja utjecaja pripreme podloge i provođenja postupka naštrcavanja na otpornost prevlaka na abrazijsko trošenje da bi se moglo zaključiti koja od varijanti postupka daje optimalne rezultate otpornosti na abrazijsko trošenje. Priprema i ispitivanje uzoraka provedena je u laboratorijima Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

#### 4.1. PRIPREMA UZORAKA

Čelični uzorci su izrezani na konačne dimenzije iz jednog komada čelične ploče koja je prije samog postupka rezana i pjeskarena. Postupak pjeskarenja i izrezivanja uzoraka proveden je u Laboratoriju za ljevarstvo FSB-a. Nakon što su uzorci izrezani označeni su pomoću žigova da bi se kasnije mogli razlikovati.

Uzorcima je prije bilo kakve obrade izmjena početna hrapavost pomoću uređaja Surtronic duo, proizvođača Taylor Hobson precision prikazanog na slici 28.



Slika 28 – Uređaj za mjerenje hrapavosti Surtronic duo

Mjerenje hrapavosti ponavljano je tri puta za svaki uzorak na različitim mjestima da bi se dobila što točnija vrijednost hrapavosti  $R_a$ . Dobiveni su rezultati navedeni u tablici I.

Tablica I – Izmjerene početne vrijednosti hrapavosti površine uzoraka

MJERENJE POČETNE HRAPAVOSTI POVRŠINE				
UZORAK	1. MJERENJE $R_a, \mu\text{m}$	2. MJERENJE $R_a, \mu\text{m}$	3. MJERENJE $R_a, \mu\text{m}$	$\overline{R_a}, \mu\text{m}$
C	8,18	12,21	10,84	10,41
L	13,01	6,08	4,11	7,33
X	14,38	6,07	9,42	10,11
H	5,72	12,43	6,84	8,33
7	11,21	11,82	7,04	10,03
V	7,87	6,93	12,7	9,17
S	11,68	6,16	9,99	9,28
U	13,74	7,86	11,38	10,99
D	12,52	11,24	8,26	10,67
Y	7,61	10,19	12,56	10,12
G	9,51	6,9	9,03	8,48
J	13,06	9,24	9,05	10,45

Nakon što je izmjerena početna hrapavost uzoraka, uzorci V, H, 7, S, L, i G su ručno brušeni brusnim papirom Q SE 22 Alox paper marke ZIA koji je imao hrapavost P 150. Uzorci su brušeni oko 5 minuta svaki i nakon toga se ponovno mjerila njihova površinska hrapavost. Dobiveni rezultati dani su u tablici II.

Tablica II – Izmjerene hrapavosti brušenih uzoraka

MJERENJE HRAPAVOSTI BRUŠENIH UZORAKA				
UZORAK	1.MJERENJE $R_a, \mu\text{m}$	2.MJERENJE $R_a, \mu\text{m}$	3.MJERENJE $R_a, \mu\text{m}$	$\overline{R_a}, \mu\text{m}$
V	4,63	2,89	2,81	3,44
H	2,61	6,11	5,21	4,64
7	3,59	3,05	2,07	2,9
S	1,93	3,28	5,77	3,69
L	2,97	4,08	2,56	3,2
G	4,66	5,66	4,33	4,88

Mjerenjem površinske hrapavosti brušenih uzoraka dobivena je njihova prosječna površinska hrapavost  $\overline{R_a} = 3,79$  što je oko 36% vrijednosti površinske hrapavosti nebrušenih uzoraka ( $\overline{R_a} = 10,45$ ), znači otprilike 1/3 vrijednosti početne površinske hrapavosti. Brušenje, tj. smanjivanje površinske hrapavosti dijela uzoraka provedeno je zato da bi se kasnije moglo utvrditi da li i kakav utjecaj hrapavost podloge ima na otpornost  $\text{Al}_2\text{O}_3$  prevlake na abrazijsko trošenje.

Označavanje, brušenje i mjerenje površinske hrapavosti uzoraka provedeno je u Laboratoriju za mehanička ispitivanja FSB-a.

## **4.2. ISPITIVANJE KEMIJSKOG SASTAVA UZORAKA**

U Laboratoriju za analizu metala Fakulteta strojarstva i brodogradnje napravljena je kvantitativna kemijska analiza dostavljenih uzoraka. Kemijska analiza obavljena je spektrometrijskom metodom na uređaju SPECTROMAT 700 GDS LEICO i dobiveni su rezultati dati u tablici III .

Tablica III – Maseni udio pojedinih elemenata u čeličnoj podlozi

ELEMENT	MASENI UDIO, %
C	0,20
Si	0,24
Mn	0,72
P	0,010
S	0,004
Cu	0,057
Ni	0,057
Cr	0,042
Mo	0,29
Fe	ostatak

### **4.3. PLAMENO NAŠTRCAVANJE UZORAKA**

#### **4.3.1. PRAŠKOVI ZA NAŠTRCAVANJE**

Za potrebe ovog rada, odnosno za nanošenje  $\text{Al}_2\text{O}_3$  prevlake korišten je prah METACERAM 28030. Ovo je oksidnokeramički sivi prah koji se koristi za slojeve otporne na trošenje. Mikrotvrdoća mu je cca 1600 HV, ima visoku otpornost na trošenje trenjem metal-metal. Maksimalna radna temperatura je cca 540 °C. Koristi se za slojeve protiv trošenja na valjcima za transport papira, vodilicama niti, kliznim pločama. Uobičajene debljine slojeva od ovog praha su oko 350  $\mu\text{m}$ . Kako bi se izbjegle nestabilne faze, koje bi mogle prouzročiti pukotine u sloju, prašak je stabiliziran dodacima. Stabiliziranjem je povećana unutarnja čvrstoća sloja, što je povoljno kad nastupe mehanička opterećenja. Jedan od takvih stabilizatora je prah XUPER ULTRA BOND 51000. To je prašak na bazi Ni i Al koji se koristi radi boljeg prijanjanja sloja za podlogu (prilikom naštrcavanja). Primjenjuje se za izradu osnovnih prijanjajućih slojeva na svim čelicima, materijalima od Al i Ni.

#### **4.3.2. POSTUPAK NAŠTRCAVANJA**

Nakon što je izmjerena površinska hrapavost pripremljenih uzoraka, uzorci su ostavljeni da se odmaste u Dilucente-nitro otopini u trajanju od 12h. Nakon odmašćivanja uzorci su osušeni te je na njih plameno naštrcana  $\text{Al}_2\text{O}_3$  prevlaka. Postupak naštrcavanja proveden je pomoću uređaja CASTODIN DS 8000 u Laboratoriju za nemetale FSB-a.





Slika 29 – Uzorci prilikom sušenja: gornji red – pjeskareni uzorci  
donji red – brušeni uzorci

Naštrcavanje je provedeno hladnim postupkom plamenog, tj. plinskog naštrcavanja uz predgrijavanje na 100 °C. Za naštrcavanje uzoraka G, 7, S, D, X, J korišten je keramički prah METACERAM 28030 s time da je prethodno na osnovni materijal, tj. uzorke nanesen prašak XUPER ULTRA BOND 51000 kao vezivo, odnosno temelj. Vezivo smo također nanosili postupkom plamenog naštrcavanja. Na uzorke V, H, L, U, Y, C je nanesen prah METACRAM 28030 bez prethodnog nanošenja veziva, tj. temelja.

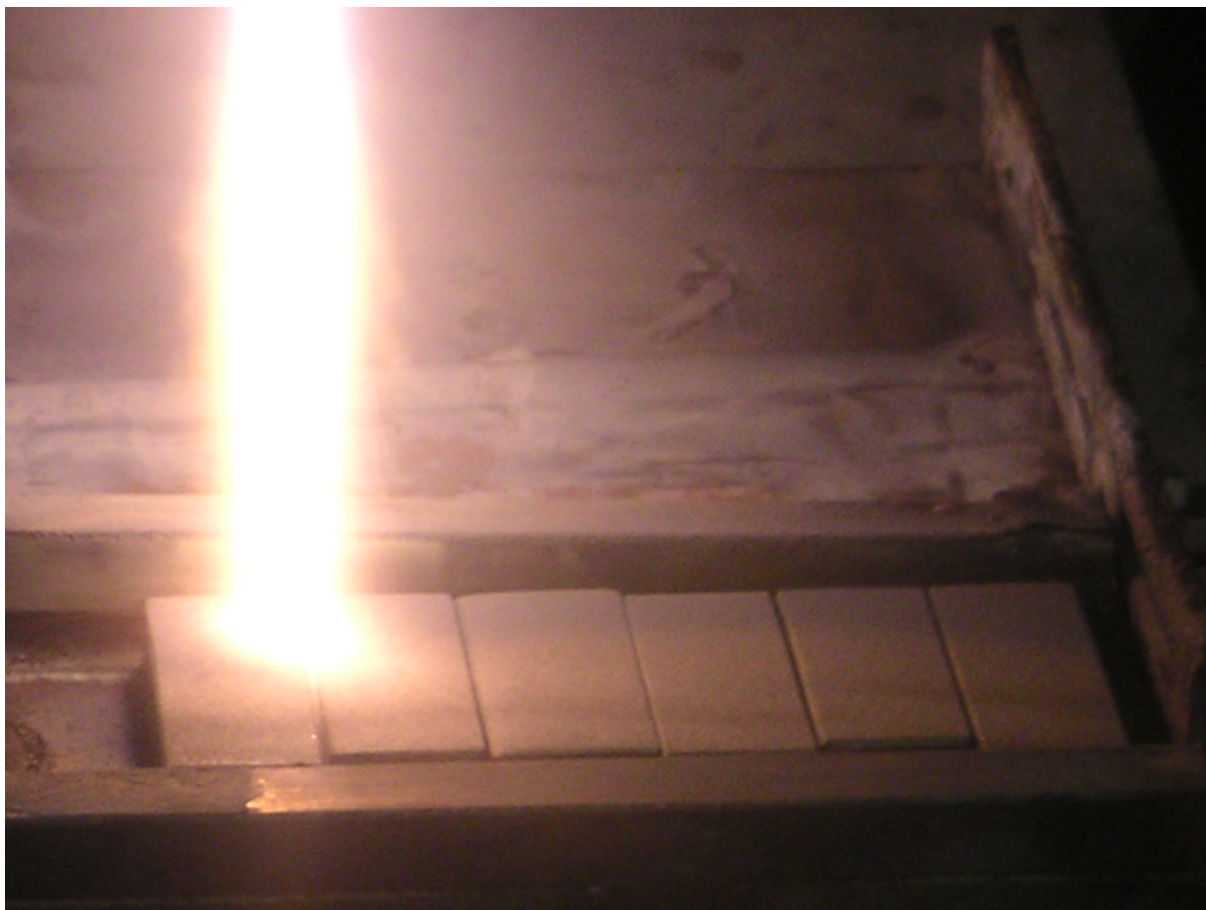


Slika 30 – Predgrijavanje uzoraka

Postupak naštrcavanja se provodio na udaljenosti sapnice od uzoraka od 10 cm pod kutem od 45°. Tlak komprimiranog zraka je bio 3 bar bez podmazivanja, tj. ulja.

Prilikom naštrcavanja vezivnog praha i praha METACERAM 28030, tlak acetilena je iznosio 0,7 bar, dok je tlak kisika iznosio 4 bar. Kod naštrcavanja vezivnog praha, tj. temelja korištena je dijafragma 3 dok je kod naštrcavanja METACERAMA korištena dijafragma 2. Postupak naštrcavanja se provodio u dva navrata zbog toga što se osnovni materijal tj. podloga prilikom naštrcavanja zagrijavala. Pošto temperatura podloge nije smjela prijeći 200 °C, uzorci su se prije daljnjeg nanošenja  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sloja morali ohladiti. Pri samom postupku nanošenja  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sloja na uzorak L došlo je do njegovog bubrenja i ljuštenja što će se morati uzeti u obzir prilikom daljnjeg ispitivanja.





Slika 31 – Plameno nanošenje vezivnog praha XUPER ULTRA BOND 51000 na  
uzorke G, 7, S, D, X i J



Slika 32 – Plameno nanošenje praha METACERAM 28030 na uzorke

Opisanim postupcima, znači brušenjem i hladnim postupkom plamenog naštrcavanja te njihovom međusobnom kombinacijom dobivena su četiri različita tipa uzoraka predviđenih za ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje:

tip1.

Radi se o uzorcima pripremljenim na način kako to propisuje proizvođač keramičkog praha METACERAM 28030. Znači da je čelična podloga pjeskarena nakon čega je odmašćena u Dilucenite nitro otopini u trajanju od 12h. Nakon odmašćivanja i sušenja na uzorke je nanesen, tj. plameno naštrcan sloj vezivnog praha XUPER ULTRA BOND 51000 nakon čega je plameno naštrcan sloj  $\text{Al}_2\text{O}_3$  na prethodno opisan način.

To su uzorci s oznakama: D, X i J

tip 2.

Ovi su uzorci nakon pjeskarenja ručno brušeni da bi im se smanjila površinska hrapavost, nakon toga su poput svih uzoraka odmašćivani u trajanju od 12h i potom sušeni. Odmah poslije sušenja na njih je plinski nanescena najprije vezivna podloga, a zatim sloj  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

To su uzorci s oznakama: G, 7 i S

tip 3.

Ovi uzorci su nakon pjeskarenja odmašćeni i sušeni (nije ih se brusilo) da bi odmah nakon toga na njih plamenim naštrecavanjem nanescen sloj  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Prilikom naštrecavanja  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sloja nije korišteno vezivo, tj. nije prethodno nanescena vezivna podloga nego je na pjeskarenu podlogu izravno nanescen sloj  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

To su uzorci s oznakama: U, Y i C

tip 4.

Radi se o uzorcima koji su nakon pjeskarenja ručno brušeni poput uzoraka Tip 2 i također odmašćeni i sušeni. Neposredno nakon sušenja na njih je nanescen sloj  $\text{Al}_2\text{O}_3$  bez veziva, tj. vezivne podloge kao i kod uzoraka tipa 3.

To su uzorci s oznakama: V, H i L.

Ovim kombinacijama postupaka pripreme i nanošenja  $\text{Al}_2\text{O}_3$  prevlake na uzorke dobivene su četiri vrste s po tri uzorka:

tip 1 – pripremljen po propisima proizvođača praška za naštrecavanje

tip 2 – brušen s nanescenim vezivom

tip 3 – pjeskaren bez nanescenog veziva

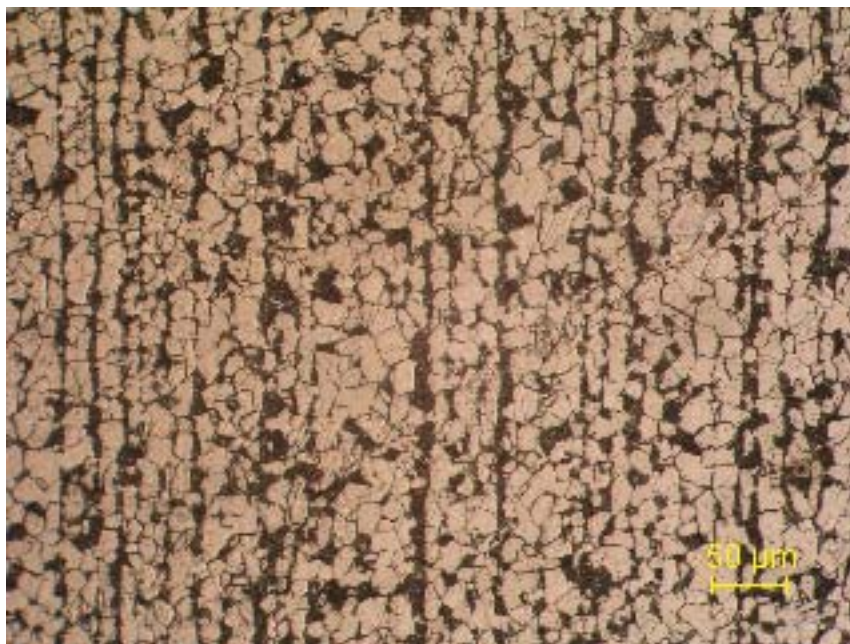
tip 4 – brušen bez nanescenog veziva

#### **4.4. METALOGRAFSKA ANALIZA**

Metalografska analiza napravljena je u Laboratoriju za metalografiju FSB-a. Metalografski je pripremljena površina okomita na smjer pružanja prevlake. Ova priprema uključuje rezanje uzoraka, zalijevanje u plastičnu masu, brušenje, poliranje i nagrizanje u kemijskom otapalu nitalu ( 3% otopina  $\text{HNO}_3$  ). Nakon pripreme uzorci su fotografirani pod povećanjima od 50:1, 200:1 i 500:1.

Metalografski je analizirana samo jedna vrsta uzoraka i to onaj tipa 1, tj. onaj kod kojeg je sloj  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanesen nakon prethodnog nanošenja vezivnog sloja. Na ostalim vrstama uzoraka nije bilo moguće napraviti metalografsku analizu zbog toga što kod pripreme, tj. rezanja uzoraka za analizu je došlo do odvajanja naštrcanog sloja od čelične podloge i stoga je daljnja analiza bila nemoguća. Metalografski je analiziran uzorak s oznakom D pomoću svjetlosnog mikroskopa Olympus BH-2.

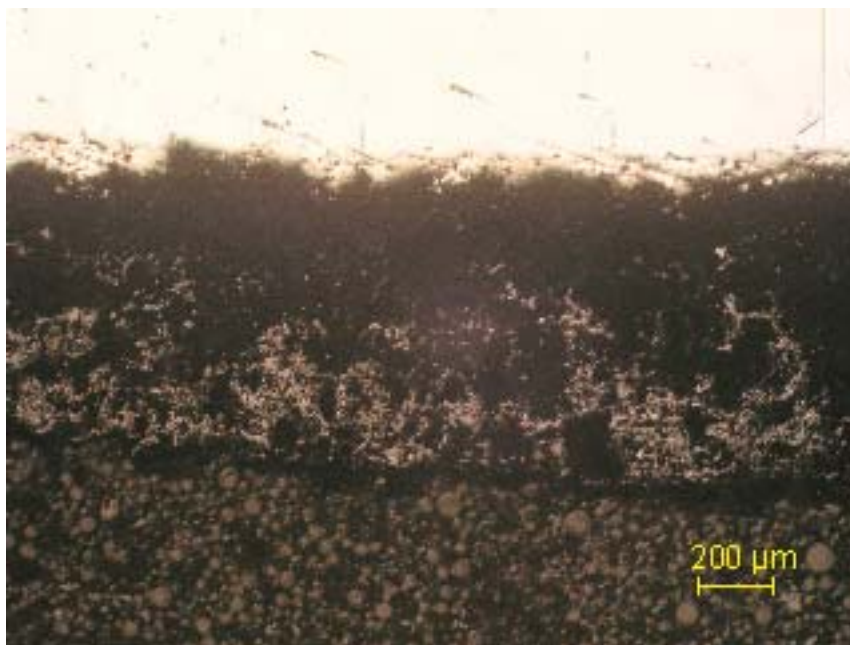
Metalografskom je analizom utvrđeno da je čelična podloga sastoji od usmjerene strukture od otprilike 2/3 ferita i 1/3 perlita, kao što se vidi na slici 33.



Slika 33 – Mikrostruktura čelične podloge u nagrizenom stanju pri povećanju 200:1



Debljina  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sloja je oko 800  $\mu\text{m}$  što se može vidjeti na fotografiji nenagrizenog i zarotiranog za  $90^\circ$  uzorka pri povećanju od 50:1, prikazanoj na slici 34.



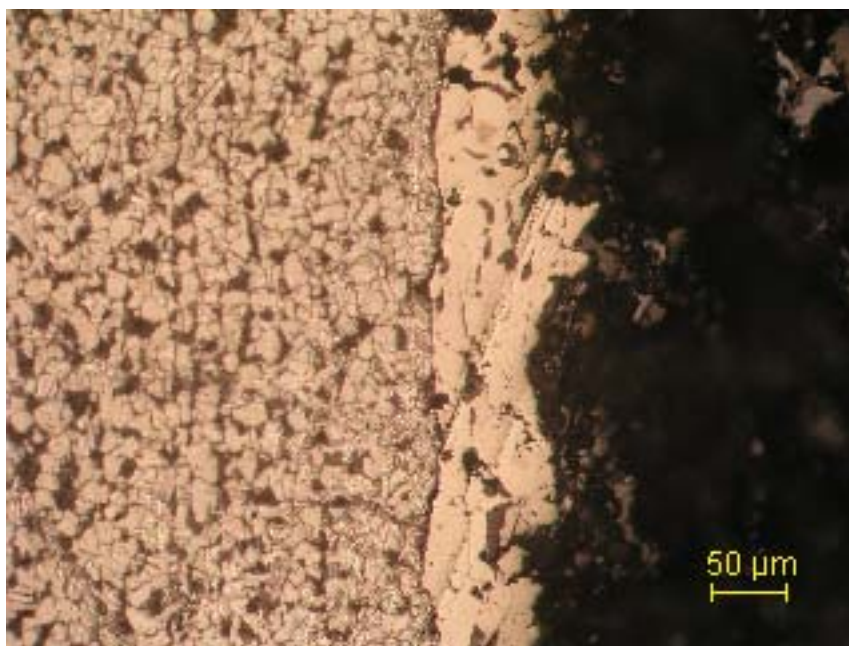
Slika 34 – Mikrostruktura  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sloja u poliranom stanju pri povećanju 50:1



Slika 35 – Mikrostruktura  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sloja u nagrizenom stanju pri povećanju od 50:1

Na slikama je uočljiva velika poroznost nanesenog  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sloja koji je gotovo spužvaste strukture što rezultira slabijim međusobnim povezivanjem čestica u sloju i samim time slabijom otpornošću na abrazijsko trošenje.

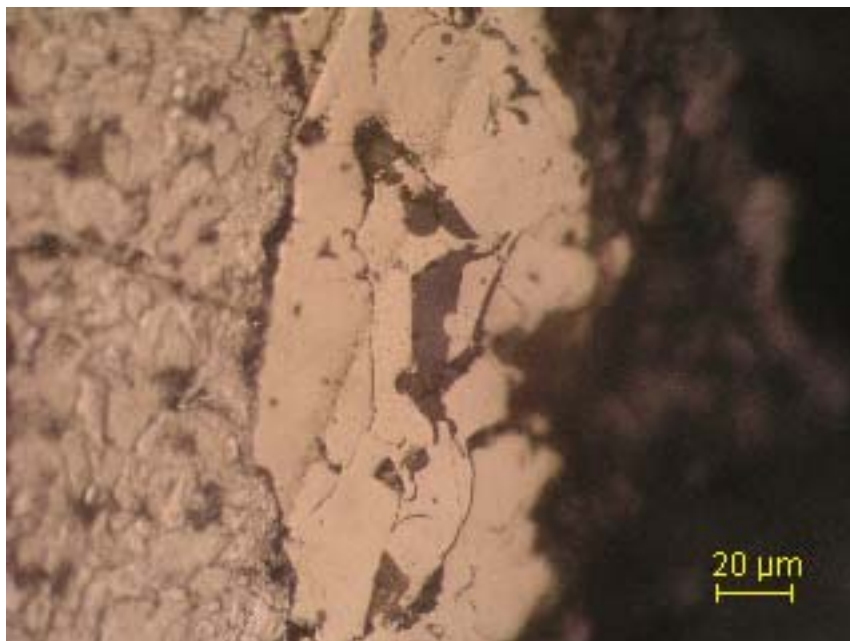
Pri većim povećanjima ( 200:1 i 500:1 ) mikroskopa jasno se uočava vezivni međusloj koji je svjetliji od podloge i debljine od 50 do 80  $\mu\text{m}$ .



Slika 36 – Mikrostruktura vezivnog sloja pri povećanju od 200:1



Na slikama vezivnog međusloja može se uočiti da je on kompaktniji i znatno manje porozan od sloja  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .



Slika 37 – Mikrostruktura vezivnog međusloja pri povećanju od 500:1

#### 4.5. MJERENJE MIKROTVRDOĆE UZORKA

Nakon metalografske analize na istom uzorku mjerena je njegova mikrotvrdoća. Mikrotvrdoća je mjerena metodom VICKERS pomoću mikrotvrdomjera PMT-3 pod opterećenjem od 200 g.

Tablica IV – Mikrotvrdoća čelične podloge

Broj mjerenja	Mikrotvrdoća	Srednja mikrotvrdoća
1.	167 HV <sub>0,2</sub>	165 HV <sub>0,2</sub>
2.	159 HV <sub>0,2</sub>	
3.	169 HV <sub>0,2</sub>	

Prilikom mjerenja mikrotvrdoće sloja došlo je do poteškoća budući da je nanese sloj jako porozan što je rezultiralo vrlo velikim rasipanjem izmjerenih vrijednosti, dok su prilikom mjerenja mikrotvrdoće čelične podloge rezultati bili ujednačeniji. Tablica IV prikazuje vrijednosti mjerenja mikrotvrdoće podloge.

Dobivena srednja mikrotvrdoća  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sloja ne daje realnu vrijednost mikrotvrdoće nanesenog  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sloja jer zbog njegove velike poroznosti igla mikrotvrdomjera ne prodire uvijek okomito u odnosu na površinu uzorka, a osim toga može se pretpostaviti da ispod velikog djela mjesta prodiranja igle u materijal postoje šupljine što također onemogućuje točno mjerenje mikrotvrdoće. Stoga bi kao realne vrijednosti mikrotvrdoće trebalo uzimati iznad 700 HV<sub>0,2</sub>. Tablica V prikazuje vrijednosti mjerenja mikrotvrdoće  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sloja.

Tablica V – Mikrotvrdoća  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sloja

Broj mjerenja	Mikrotvrdoća	Srednja mikrotvrdoća
1.	937 HV0,2	677 HV0,2
2.	909 HV0,2	
3.	391 HV0,2	
4.	391 HV0,2	
5.	369 HV0,2	
6.	303 HV0,2	
7.	415 HV0,2	
8.	707 HV0,2	
9.	833 HV0,2	
10.	689 HV0,2	
11.	996 HV0,2	
12.	608 HV0,2	
13.	833 HV0,2	
14.	608 HV0,2	
15.	833 HV0,2	
16.	746 HV0,2	
17.	788 HV0,2	
18.	833 HV0,2	

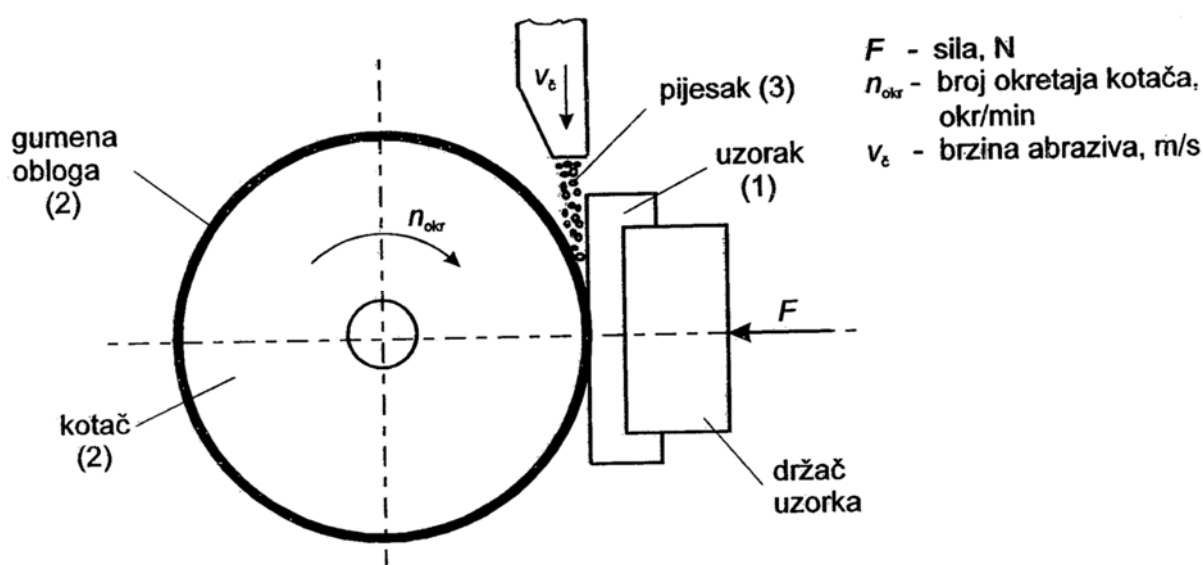
Mjerenja pod rednim brojevima 1 do 8 su rađena nasumično, ona od 9 do 13 su rađena po dubini sloja a ona od 14 do 18 po dužini, tj. paralelno pružanju sloja. Kod svih mjerenja se nastojalo da točka prodiranja igle mikrotvrdomjera u materijal bude na mjestu relativno najkompaktnije strukture.

## 4.6. OTPORNOST NA ABRAZIJU

### 4.6.1. TEST SUHI PIJESAK/GUMENI KOTAČ

Ova metoda ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje standardizirana je prema ASTM G65-94. Skicu uređaja prikazuje slika 38.

Test se sastoji od abradiranja epruvete (1) (12x25x75mm) standardnim zaobljenim kvarcnim pijeskom Ottawa AFS 50/70 (3). Epruveta se naslanja na kotač (2) obložen gumom tvrdoće oko 60 Shore A, a opterećena je utezima preko koljenaste poluge. Sila  $F$  iznosi 45 N ili 135 N, ovisno o varijanti postupka. Također je promjenjiv i ukupni broj okretaja kotača koji se registrira brojačem.



Slika 38 – Skica uređaja „suhi pijesak/gumeni kotač“, [19]

Varijante testa suhi pijesak/gumeni kotač navedene su u tablici VI.

Tablica VI – Varijante testa „suhi pijesak/gumeni kotač“

Varijanta postupka	Sila na epruvetu, N	Broj okretaja kotača	Relativni put, m
A	130	6000	4309
B	130	2000	1436
C	130	100	71,8
D	45	6000	4309

Vaganjem epruvete prije i poslije testa utvrđuje se gubitak mase koji se preračunava u gubitak volumena po ASTM G 65-94. Ova metoda omogućuje relativno svrstavanje otpornosti na abrazijsko trošenje različitih slojeva, ako je prevladavajući mehanizam abrazija.

Najveća prednost ove metode je što je ona standardizirana, čime je moguća usporedivost rezultata dobivenih u različitim laboratorijima.

#### 4.6.2. ISPITIVANJE OTPORNOSTI NA ABRAZIJSKO TROŠENJE

Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje hladnim postupkom plamenog naštrcavanja nanesenog  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sloja izvedeno je na uređaju «suhi pijesak/ gumeni kotač». Ovaj uređaj namijenjen je ispitivanju na abrazijsko trošenje sukladno ASTM G 65-94 normi. Ispitivano je po tri uzorka sva četiri tipa, ukupno 12 uzoraka.

Postupak ispitivanja sastoji se od abradiranja ispitnog uzorka, koji je dimenzija otprilike 70x25x12 mm, kvarcnim pjeskom za ispitivanje tipa Ottawa AFS 50/70. Kod ovog pijeska veličina zrnaca iznosi između 212 i 300  $\mu\text{m}$ . Pijesak se dovodi između ispitnog uzorka i rotirajućeg kotača obloženog gumom propisane tvrdoće (60 Shore-A).



Slika 39 – Uređaj za mjerenje otpornosti na abrazijsko trošenje metodom „suhi pijesak/gumeni kotač“ ( Laboratorij za tribologiju FSB-a )

Rotacija kotača je takva da se on giba u smjeru istjecanja pijeska. Ispitni uzorak je opterećen silom preko koljenaste poluge čiji oslonac leži u ravnini koja je približno tangencijalna na obod gumenog kotača, a okomita na horizontalni promjer u smjeru djelovanja sile. Protok pijeska iznosi 300 g/min, a promjer kotača je 222,4mm.

Trajanje ispitivanja ovisi o varijanti postupka. U ovom radu provedeno je ispitivanje modificiranim varijantama C i D, gdje je kod varijante C umjesto ispitivanja trošenja nakon 100 okretaja kotača ispitivano trošenje i nakon 200 okretaja kotača. Isti takav postupak je proveden i kod varijante D gdje je umjesto 6000 okretaja ispitivano trošenje nakon 100 i 200 okretaja gumenog kotača.

Mjera otpornosti na abrazijsko trošenje je gubitak volumena do kojeg dolazi uslijed trošenja ispitnog uzorka. Gubitak volumena izračunat je prema gubitku mase, a za gustoću prevlaka korišteni su podaci iz literature.

Gubitak mase, tj. razlika u masi ispitnog uzorka prije i poslije, mjerena je pomoću vage METTLER B5C 1000, rezolucije 0,0001g.



Slika 40 – Vaga METTLER B5C 1000

Pri ispitivanju otpornosti na abrazijsko trošenje zbog kratkog trajanja ispitivanja, zanemaren je utjecaj umora površine. Također zbog kratkog trajanja ispitivanja, ne dolazi do značajnog zagrijavanja ispitnog uzorka pa je zanemaren i utjecaj zagrijavanja, tj. utjecaj različitosti koeficijenata toplinskog rastezanja osnovnog materijala i materijala prevlake.

Debljina prevlaka je oko 800  $\mu\text{m}$ , a srednje vrijednosti mikrotvrdoće po pojedinoj fazi iznose: 165 HV<sub>0,2</sub> za meku fazu, tj. podlogu i 677 HV<sub>0,2</sub> za tvrdu fazu, tj. sloj Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

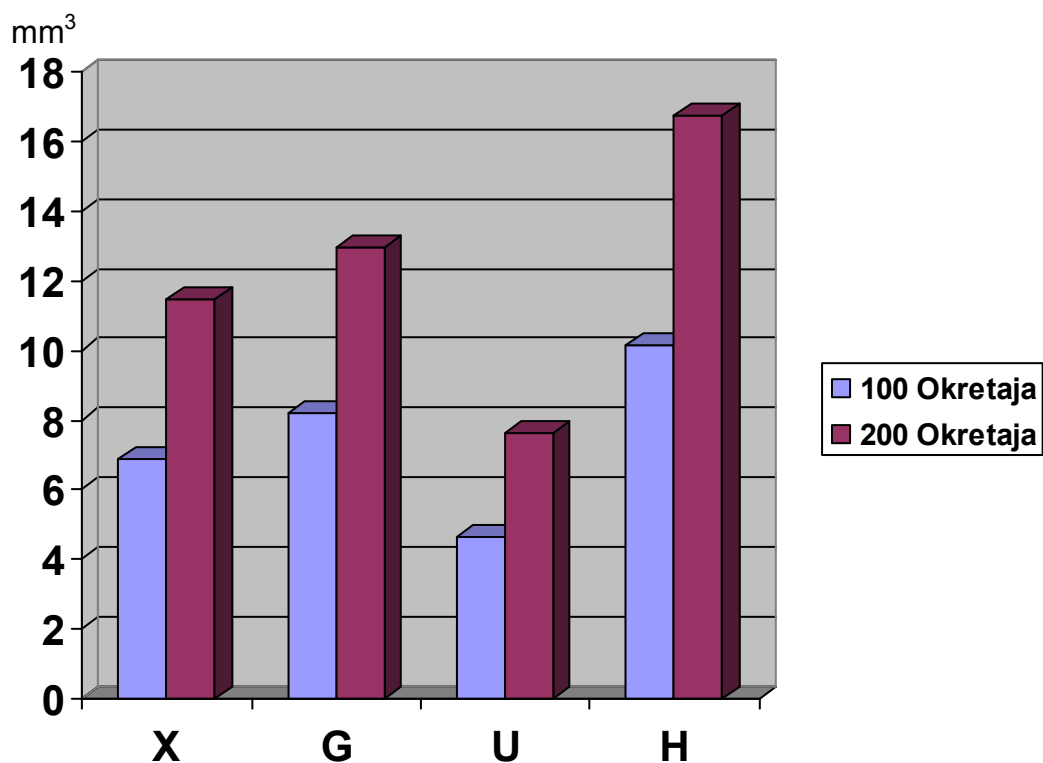
Modificiranom varijantom D ispitivan je po jedan uzorak svakog tipa te nakon njihovog vaganja izračunan je gubitak volumena. To su bili uzorci: X, G, U i H. Prilikom računanja gubitka volumena pomoću gubitka mase, za vrijednost gustoće uzimana je vrijednost  $\rho = 3980 \text{ kg/m}^3$ . [19]

Tablica VII. pokazuje gubitak volumena hladno plinski naštrecane  $\text{Al}_2\text{O}_3$  prevlake prema ASTM G 65-94, modificiranom varijantom D (45 N, 100 i 200 okretaja kotača).

Tablica VII – Gubitak volumena hladno plinski naštrecane  $\text{Al}_2\text{O}_3$  prevlake pri opterećenju 45 N

TIP	UZORAK	$\Delta V, \text{ mm}^3$	
		100 okretaja	200 okretaja
1	X	6,8844	11,4824
2	G	8,2161	12,9648
3	U	4,6482	7,6382
4	H	10,1256	16,7337





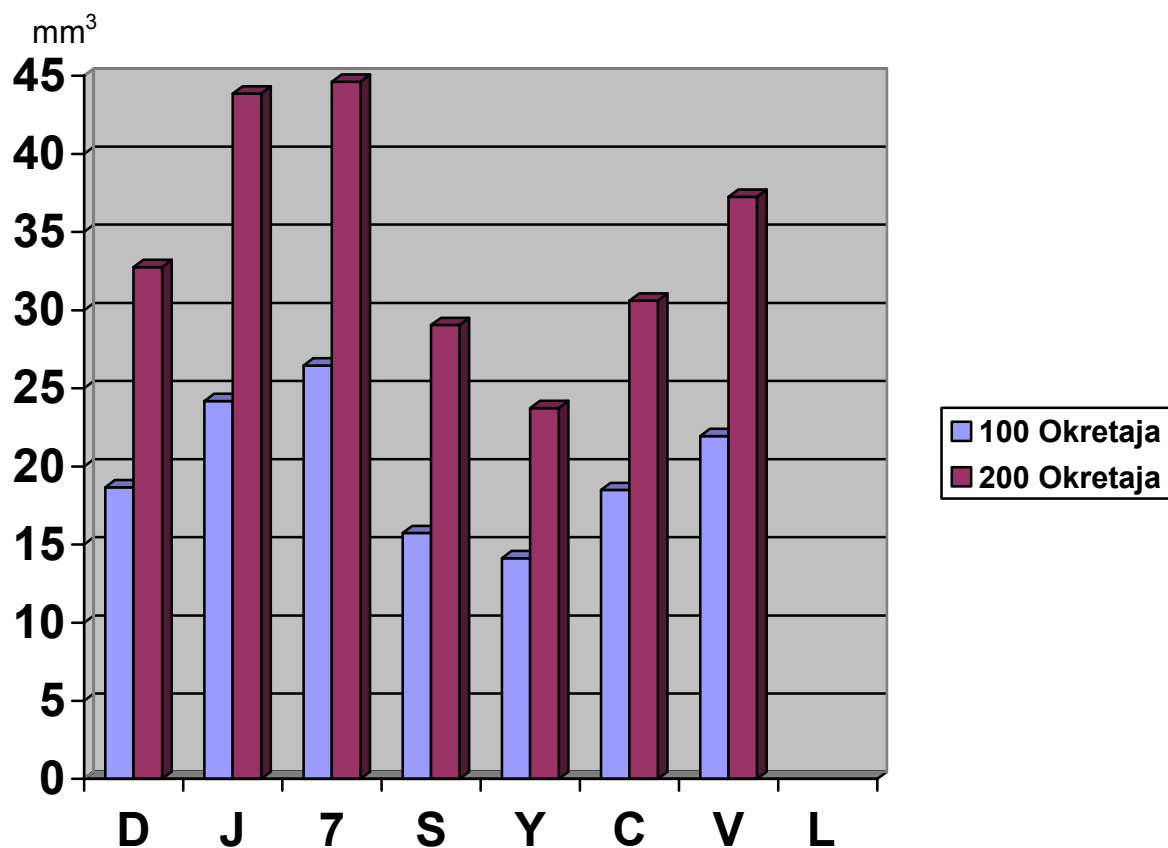
Slika 41 – Dijagram gubitka volumena uslijed abrazije za uzorke X, G, U i H pri opterećenju od 45 N, u mm<sup>3</sup>

Ostali uzorci ispitivani su modificiranom varijantom C, po dva uzorka svakog tipa i također nakon njihovog vaganja računat je gubitak volumena. Za računanje gubitka volumena uzeta je ista vrijednost gustoće kao i kod varijante D. To su bili uzorci: D, J, 7, S, Y, C, V i L.

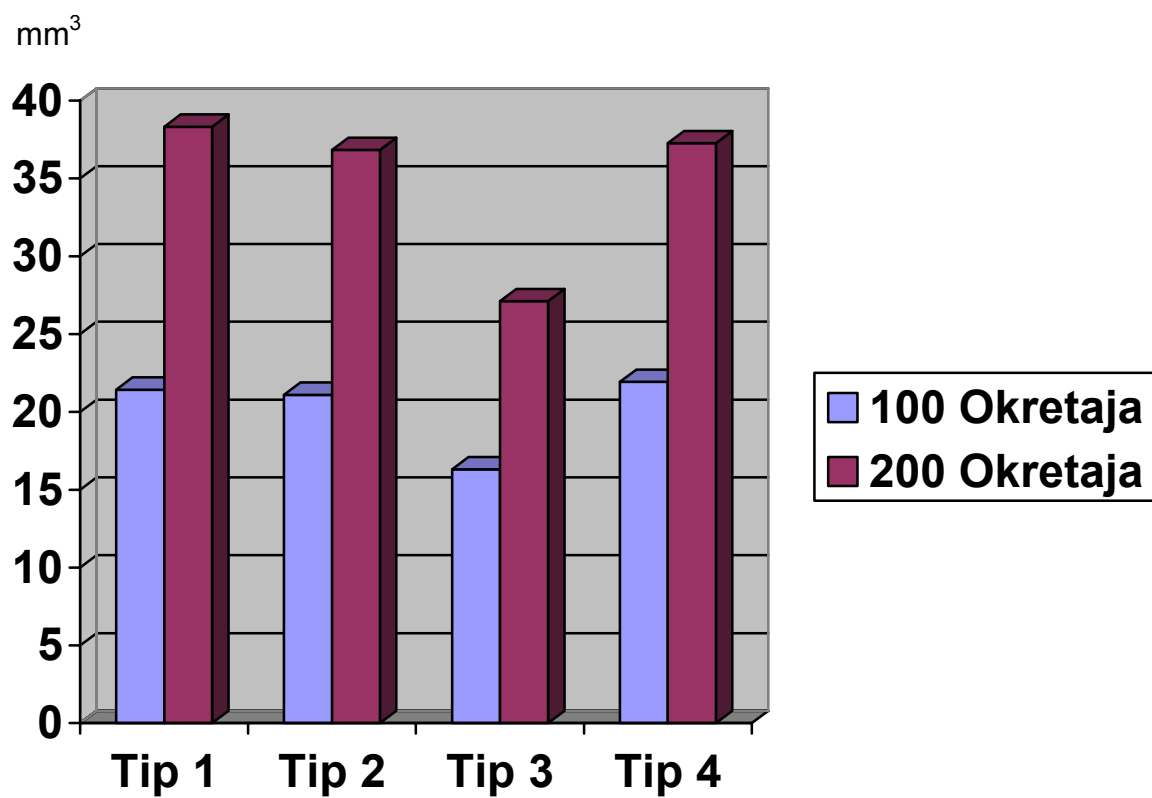
Tablica VIII. pokazuje gubitak volumena hladno plinski naštrecanog Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sloja prema ASTM G 65-94, modificiranom varijantom C (130N, 100 i 200 okretaja kotača).

Tablica VIII – Gubitak volumena hladno plinski naštrecane  $\text{Al}_2\text{O}_3$  prevlake pri opterećenju 135 N

TIP	UZORAK	$\Delta V$ , mm <sup>3</sup>		$\overline{\Delta V}$ , mm <sup>3</sup>	
		100 OKR	200 OKR	100 OKR	200 OKR
1	D	18,6683	32,7638	21,4321	38,3165
	J	24,1960	43,8693		
2	7	26,4573	44,6231	21,0929	36,8341
	S	15,7286	29,0452		
3	Y	14,1206	23,7437	16,3065	27,1133
	C	18,4925	30,6030		
4	V	21,9347	37,2613	21,9347	37,2613
	L	Sloj se odljuštio			



Slika 42 – Dijagram gubitka volumena uslijed abrazije pri opterećenju od 135 N za uzorke D, J, 7, S, Y, C, V i L, u mm³



Slika 43 – Dijagram srednjeg gubitka volumena uslijed abrazije pri opterećenju od 135 N za pojedine tipove uzoraka, u mm<sup>3</sup>

## 5. ZAKLJUČAK

Postupci modifikacija površine materijala predstavljaju jednu od mogućnosti ušteda u proizvodnji, smanjenje troškova održavanja i očuvanja energije. Danas postoji veliki broj vrsta prevlaka kao i načina njihovog nanošenja na neki osnovni materijal. U ovom radu je dan kratak opis i ispitivanje jedne takve prevlake.

Ako usporedimo rezultate ispitivanih  $\text{Al}_2\text{O}_3$  prevlaka nanesenih hladnim plinskim naštrecavanjem na otpornost na abraziju testom suhi pijesak/gumeni kotač možemo vidjeti da su se najotpornijim pokazali uzorci tipa 3.

Kod uzorka tipa 3, tj. kod nebrušenih uzoraka na koje je nanesen sloj  $\text{Al}_2\text{O}_3$  bez veziva utvrđen je najmanji gubitak mase, tj. volumena i prema tome se može zaključiti da je ta vrsta prevlake najotpornija na abrazijsko trošenje.

Uzorci na koje je nanesen sloj  $\text{Al}_2\text{O}_3$  uz pomoć veziva, tj. tip 1 i tip 2 pokazali su se srednje otpornima na abrazivno trošenje, ali općenito gledano uzorci tip 1 su se pokazali najboljima zato jer je kod njih primijećena najjača veza između sloja i podloge, što se pokazalo prilikom pripreme za metalografsku analizu. Najmanje otpornim pokazali brušeni uzorci na koje je nanesen  $\text{Al}_2\text{O}_3$  bez veziva, tip 4. Kod jednog uzorka je došlo do odvajanja nanesenog  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sloja od podloge (kod uzorka s oznakom L). Pošto se radi o brušenom uzorku, tj. o uzorku smanjene hrapavosti može se zaključiti da hrapavost površine ima veliki utjecaj na prionjivost hladno naštrecanih  $\text{Al}_2\text{O}_3$  prevlaka zato što ona poglavito ovisi o mehaničkom sidrenju, a kako hrapaviji materijal ima veću površinu mehaničko sidrenje je jače.

Na kraju se može zaključiti da veliki utjecaj na otpornost abrazivnom trošenju hladno plinski naštrecanih  $\text{Al}_2\text{O}_3$  prevlaka ima njihova prionjivost na podlogu na koju su nanesene.

## 6. POPIS LITERATURE

- [1] V. Ivušić, „Tribologija“, Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, Zagreb 1998.
- [2] G. Heffer, „Trošenje triboloških prevlaka pri gibanju u masi slobodnih čestica“, Disertacija, FSB, Zagreb 2002.
- [3] L. Fang, X.L. Kong, J.Y. Su, Q.D. Zhou, „Movement of patterns of abrasive particles in three-body conditions“, Wear 200(1996)281-295.
- [4] R.C.D. Richardson, „The wear of metals by relatively soft abrasives“, Wear 11(1968), 245-275.
- [5] K.-H. Zum Gahr, „Microstructure and Wear of Materials“, Elsevier, Amsterdam-Oxford-New York 1987.
- [6] K.-H. Zum Gahr, „Wear by hard particles“, Tribology Int., 31(10)1998, 587-596
- [7] M.A. Moore, „A Review of Abrasive Wear“, Dept. Note DN/ER/282/1160, N.I.A.E. Silsoe Bedford, 1973. (unpubl.)
- [8] M.A. Moore, F.S. King, „Abrasive wear of brittle solids“, Wear 60(1980), 123-140
- [9] G.K. Nathan, W.J.D. Jones, „The empirical relationship between abrasive wear and the applied conditions“, Wear 9(1966), 300-309
- [10] H. Czichos, „Tribology – a system approach to the science and technology of friction, lubrication and wear“, Elsevier, Amsterdam-Oxford-New York 1978.
- [11] W.L. Silence, „Effect of structure on wear resistance of Co-, Fe- and Ni-base alloys“, Transactions of the ASME 100(1978), 428-435
- [12] G.R. Davies, „Abrasion Tests on Plastics, Elastomers and Ferrous Metals“, Journal of agricultural Engng. Res. (1967)12(1), 55-60

- [13] M.A. Moore, V.A. McLees, „Effect of Speed on Wear of Steels and a Copper by Bonded Abrasive and Soils“, Journal of agricultural Engng. Res. (1980)25, 37-45
- [14] R.E. Winter, I.M. Huchins, „Solid particle erosion studies using single angular particles“, Wear 29(1974), 181-194
- [15] I. Finnie, D.H. McFadden, „On the velocity dependence of the erosion of ductile metals by solid particles at low angles of incidence“, Wear 48(1978), 181-190
- [16] I. V. Kragelsky, A.I. Zolotar, A.O. Sheiwekhman, „Theory of material wear by solid particle impact – a review“, Tribology Int. 18(1985), 3-11
- [17] K Šimunović, „Optimizacija tribomehaničkih svojstava plinski naštrecanih slojeva“, Disertacija, FSB, Zagreb 2004.
- [18] Z: Schauperl, „Utjecaj tvrdoće podloge na trajnost tankih tvrdih prevlaka“, Disertacija, FSB, Zagreb 2000.
- [19] K. Grilec, „Otpornost na abrazijsko trošenje triboloških prevlaka“, Magistarski rad, FSB, Zagreb 1998.
- [20] ASTM G65-94, „Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Ruber Wheel Apparatus“, ASTM 1994.
- [21] Castodin Eutectic, „Dodatni materijali i aparati za specijalna reparaturna zavarivanja“, A.M.I. comerce, Zagreb
- [22] K. Grilec, D. Prusac, Z. Schauperl, „Prevlake otporne na abrazijsko trošenje“, MATEST `99, 207-212
- [23] K. Šimunović, G. Šimunović, T. Šarić, „Primjena postupaka plinskog naštrecavanja u tribomehaničkim sustavima“, MATRIB `06, 205-211

# SADRŽAJ

SAŽETAK

POPIS SLIKA

POPIS TABLICA

POPIS OZNAKA

1. UVOD .....	1
2. ABRAZIJA.....	2
2.1. TEORIJSKI MODEL ABRAZIJE .....	3
2.2. REALNI MODEL ABRAZIJE .....	4
2.3. ČIMBENICI KOJI UTJEČU NA ABRAZIJU .....	10
2.3.1. SVOJSTVA ABRAZIJSKIH ČESTICA .....	11
2.3.2. SVOJSTVA TROŠENOG MATERIJALA .....	13
2.3.3. RADNI UVJETI PROMATRANOG TRIBOSUSTAVA .....	21
3. PLINSKO (PLAMENO) NAŠTRCAVANJE.....	24
3.1. ZNAČAJKE PLINSKOG (PLAMENOG) NAŠTRCAVANJA.....	24
3.2. POSTUPAK HLADNOG PLINSKOG NAŠTRCAVANJA.....	26
3.3. KARAKTERISTIKE SLOJA .....	29
3.4. UTJECAJ PODLOGE.....	32
4. EKSPERIMENTALNI DIO.....	35
4.1. PRIPREMA UZORAKA .....	36
4.2. ISPITIVANJE KEMIJSKOG SASTAVA UZORAKA.....	39
4.3. PLAMENO NAŠTRCAVANJE UZORAKA.....	40
4.3.1. PRAŠKOVI ZA NAŠTRCAVANJE .....	40
4.3.2. POSTUPAK NAŠTRCAVANJA .....	40
4.4. METALOGRAFSKA ANALIZA.....	46
4.5. MJERENJE MIKROTVRDOĆE UZORKA .....	50
4.6. OTPORNOST NA ABRAZIJU .....	52
4.6.1. TEST SUHI PIJESAK/GUMENI KOTAČ.....	52
4.6.2. ISPITIVANJE OTPORNOSTI NA ABRAZIJSKO TROŠENJE.....	53



5. ZAKLJUČAK .....	61
6. POPIS LITERATURE .....	62

## POPIS SLIKA

Slika 1 – Teorijski model abrazije

Slika 2 – Jedinični događaj abrazije

Slika 3 – Abrazija u dodiru dva tijela (a) i tri tijela (b)

Slika 4 – Shematski prikaz mikromehanizama trošenja materijala

Slika 5 – Čista abrazija

Slika 6 – Selektivna abrazija

Slika 7 – Nulta abrazija

Slika 8 – Ovisnost trošenja materijala o tvrdoći abrazijskih čestica

Slika 9 – Utjecaj veličine abrazijske čestice na volumno trošenje materijala

Slika 10 – Otpornost abrazijskom trošenju različitih vrsta materijala

Slika 11 – Ovisnost otpornosti abrazijskom trošenju o tvrdoći materijala

Slika 12 – Ovisnost abrazijskog trošenja o tvrdoći abraziva

Slika 13 – Otpornost abrazijskom trošenju u ovisnosti o odnosu tvrdoća  $H_m$  i  $H_a$

Slika 14 – Ovisnost iznosa trošenja o omjeru stvarne i kritične deformacije

Slika 15 – Ovisnost abrazijskog trošenja o odnosu tvrdoća abraziv-trošeni materijal  
za višefazne materijale

Slika 16 – Međusobno djelovanje abraziva i karbida u procesu trošenja

Slika 17 – Utjecaj brzine gibanja na abrazijsko trošenje materijala

Slika 18 – Utjecaj brzine gibanja na abrazijsko trošenje čelika i željeznih ljevova

Slika 19 – Utjecaj kuta sudara na erozijsko trošenje krutim česticama

Slika 20 – Slikoviti prikaz postupka naštrcavanja

Slika 21 – Shematski prikaz postupka plinskog naštrcavanja

Slika 22 – Shematski prikaz nastajanja sloja

Slika 23 – Shematski prikaz pištolja za plinsko naštrcavanje

Slika 24 – Linije jednakog intenziteta naprezanja u jednorodnom materijalu kod  
normalnog i kliznog dodira

Slika 25 – Raspored maksimalnih naprezanja u uvjetima kliznog dodira za jednako  
opterećenje i različite faktore trenja

Slika 26 – Linije jednakog intenziteta naprezanja u materijalu s prevlakom kod:  
a) normalnog dodira, b) kliznog dodira

Slika 27 – Pucanje prevlake uslijed deformacije podloge

Slika 28 – Uređaj za mjerenje hrapavosti Surtronic duo

Slika 29 – Uzorci prilikom sušenja: gornji red – pjeskareni uzorci

donji red – brušeni uzorci

Slika 30 – Predgrijavanje uzoraka

Slika 31 – Plameno nanošenje vezivnog praha XUPER ULTRA BOND 51000 na uzorke G, 7, S, D, X i J

Slika 32 – Plameno nanošenje praha METACERAM 28030 na uzorke

Slika 33 – Mikrostruktura čelične podloge u nagrizenom stanju pri povećanju 200:1

Slika 34 – Mikrostruktura  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sloja u poliranom stanju pri povećanju 50:1

Slika 35 – Mikrostruktura  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sloja u nagrizenom stanju pri povećanju od 50:1

Slika 36 – Mikrostruktura vezivnog sloja pri povećanju od 200:1

Slika 37 – Mikrostruktura vezivnog međusloja pri povećanju od 500:1

Slika 38 – Skica uređaja „suhi pijesak/gumeni kotač“

Slika 39 – Uređaj za mjerenje otpornosti na abrazijsko trošenje metodom „suhi pijesak/gumeni kotač“ ( Laboratorij za tribologiju FSB-a )

Slika 40 – Vaga METLER B5C 1000

Slika 41 – Dijagram gubitka volumena uslijed abrazije za uzorke X, G, U i H pri opterećenju od 45 N, u  $\text{mm}^3$

Slika 42 – Dijagram gubitka volumena uslijed abrazije pri opterećenju od 135 N za uzorke D, J, 7, S, Y, C, V i L, u  $\text{mm}^3$

Slika 43 – Dijagram srednjeg gubitka volumena uslijed abrazije pri opterećenju od 135 N za pojedine tipove uzoraka, u  $\text{mm}^3$

## POPIS TABLICA

Tablica I – Izmjerene početne vrijednosti hrapavosti površine uzoraka

Tablica II – Izmjerene hrapavosti brušenih uzoraka

Tablica III – Maseni udio pojedinih elemenata u čeličnoj podlozi

Tablica IV – Mikrotvrdoća čelične podloge

Tablica V – Mikrotvrdoća  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sloja

Tablica VI – Varijante testa „suhi pijesak/gumeni kotač“

Tablica VII – Gubitak volumena hladno plinski naštrecane  $\text{Al}_2\text{O}_3$  prevlake pri opterećenju 45 N

Tablica VIII – Gubitak volumena hladno plinski naštrecane  $\text{Al}_2\text{O}_3$  prevlake pri opterećenju 135 N

## POPIS OZNAKA

<u>Oznaka</u>	<u>Značenje</u>	<u>Mjerna jedinica</u>
$F$	sila	N
$F_n$	normalna sila	N
$F_t$	tangencijalna sila	N
$H$	tvrdoća	HV
$\mu$	koeficijent trenja	-
$\rho$	gustoća	$\text{kg/m}^3$
$R_a$	površinska hrapavost (srednje odstupanje profila)	$\mu\text{m}$
$V$	volumen	$\text{mm}^3$

## SAŽETAK

U ovom radu je ukratko opisan mehanizam abrazivnog trošenja te je ponuđen kratak opis jednog od mogućih postupaka modifikacije površine. U ovom slučaju se radi o naštrecavanju aluminij-oksidge keramičke prevlake na čeličnu podlogu postupkom hladnog plinskog, tj. plamenog naštrecavanja. Također je opisano i ispitivanje abrazijske otpornosti navedene prevlake prema normi ASTM G65-94.

Provedena ispitivanja su pokazala veliki utjecaj prionjivosti prevlake na otpornost na abrazijsko trošenje hladno plinski naštrecanih  $\text{Al}_2\text{O}_3$  prevlaka. Također se pokazalo da veći utjecaj na prionjivost sloja ima hrapavost površine podloge nego postojanje vezivnog sloja.

Sveučilište u Zagrebu  
**Fakultet strojarstva i brodogradnje**

# **ZAVRŠNI RAD**

Voditelj rada:

Doc. Dr. sc. Krešimir Grilec

Tomislav Sabolić

Zagreb, 2007.

Sveučilište u Zagrebu  
**Fakultet strojarstva i brodogradnje**

# **ZAVRŠNI RAD**

Tomislav Sabolić

Zagreb, 2007.



## ***Izjava***

*Izjavljujem da sam završni rad na temu „Otpornost na abrazijsko trošenje toplinski naštrcanih  $Al_2O_3$  prevlaka“ izradio samostalno koristeći navedenu stručnu literaturu i znanje stečeno tijekom studija.*

*Stručnu pomoć u odabiru literature, definiranju postupaka te korisnim savjetima prilikom izrade svesrdno mi je pružio mentor doc. dr. sc. Krešimir Grilec.*

*Tomislav Sabolić*